

Titre: Stockage thermique saisonnier dans un champ de puits
Title: géothermiques verticaux en boucle fermée.

Auteur: Simon Chapuis
Author:

Date: 2009

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Chapuis, S. (2009). Stockage thermique saisonnier dans un champ de puits
Citation: géothermiques verticaux en boucle fermée. [Mémoire de maîtrise, École
Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/202/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/202/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Michel Bernier
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**STOCKAGE THERMIQUE SAISONNIER DANS UN CHAMP DE PUIT
GÉOTHERMIQUES VERTICAUX EN BOUCLE FERMÉE**

SIMON CHAPUIS

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

DÉCEMBRE 2009

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

STOCKAGE THERMIQUE SAISONNIER DANS UN CHAMP DE Puits
GÉOTHERMIQUES VERTICAUX EN BOUCLE FERMÉE

présenté par : CHAPUIS Simon

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MARCOTTE Denis, Ph.D., président

M. BERNIER Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. KUMMERT Michaël, Ph.D., membre

DÉDICACE

Je vous souhaite autant de plaisir à lire ce mémoire que j'en ai eu à le rédiger.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements premiers et les plus sincères vont à mon superviseur de maîtrise et directeur de recherche *M. Michel Bernier*, pour son support, sa disponibilité, son implication dans le domaine de la géothermie et de l'énergie solaire et le dynamisme transmis à son équipe de recherche.

Mes remerciements à l'entreprise Golder Associés Ltée pour m'avoir accordé son financement, à tous ses employé(e)s côtoyés durant mon stage qui m'ont permis d'améliorer la qualité de mon travail, particulièrement à *M. Pierre Groleau* pour sa confiance.

Mes remerciements aux étudiants *M. Ali Salim Shirazi*, *M. Parham Eslami Nejad* et *M. Antoine Langlois*, pour leurs contributions et leur assistance dans de nombreux travaux.

Mes remerciements au *Réseau de recherche sur les bâtiments solaires (Solar Buildings Research Network)* dans la promotion de la recherche sur les bâtiments et l'énergie solaire, pour son financement à la participation de la conférence canadienne tenue à Fredericton en 2008 et à celle tenue à Toronto en 2009.

Mes remerciements à l'*International Building Performance Simulation Association (IBPSA)*, section canadienne et *world*, pour son financement à la participation de la conférence internationale tenue à Glasgow (Écosse) en juillet 2009.

Mes remerciements à l'entreprise Tricentris - Centre de Tri et en particulier à *M. Frédéric Potvin*, directeur général, pour avoir permis d'utiliser des données expérimentales d'essai de réponse thermique collectées sur le site de l'usine de Tricentris à Terrebonne.

Mes remerciements à Parc Downsview Park Canada, particulièrement à *M. Howard Lee*, directeur exécutif de la gestion des actifs, pour sa collaboration.

Mes remerciements à l'entreprise Morrisson Hersfield, particulièrement à *M. Wassim Faraj*, directeur technique, pour sa collaboration.

Mes remerciements à l'entreprise GeoEnergy Solutions Inc., particulièrement à *M. Brian Beatty*, président, pour sa collaboration.

RÉSUMÉ

Un nouveau modèle d'échangeur géothermique vertical en boucle fermée est proposé pour une utilisation dans l'environnement TRNSYS. Deux caractéristiques le distinguent des autres modèles. Il permet l'étude de champs de puits où la position de chaque puits est définie par l'utilisateur et où deux réseaux indépendants de puits, un en mode charge et l'autre en mode décharge par exemple, peuvent être modélisés. Le modèle proposé mise sur la méthode de la ligne source finie couplée à la superposition spatiale et temporelle pour représenter le transfert de chaleur transitoire dans le sol. Le modèle proposé est validé avec succès par comparaison avec sept cas expérimentaux. De plus, ses résultats sont comparés à ceux issus du modèle DST.

Dans un autre volet de cette étude, les méthodes de calcul d'un modèle de référence dans le domaine, le modèle DST, sont mises à jour. Les limitations de ce dernier sont mises en lumière par comparaison avec le modèle proposé. Ainsi, le modèle DST est inadéquat lorsque les puits de l'échangeur géothermique à modéliser ne sont pas répartis uniformément autour du centre du volume de stockage. De plus, un problème de discontinuité dans l'évolution de la température de sortie du fluide calculée par modèle DST est également exposé. Une brève section présente les modifications apportées au code source du modèle DST de manière à prendre en compte des géométries possédant deux réseaux indépendants de tubes en U où chaque puits contient un tube en U de chaque réseau. Cette modification vise l'étude du stockage thermique à basse température et l'amélioration de l'opération du stockage thermique.

Des applications d'utilisation du modèle proposé et du modèle DST modifié sont présentées à l'intérieur de systèmes complexes de chauffage et de climatisation des bâtiments utilisant un stockage thermique dans le sol avec une recharge solaire. Une autre application du modèle proposé concerne la modélisation de quatre tuyaux formant deux tubes en U à l'intérieur d'un puits géothermique et branchés de façon à former deux réseaux indépendants.

Cette étude démontre que le modèle proposé simule correctement l'évolution de la température du fluide à la sortie d'un échangeur géothermique. Il est donc recommandé de privilégier l'utilisation du modèle proposé plutôt que du modèle DST, surtout pour les champs de puits où les puits ne sont pas répartis uniformément autour du centre du volume de stockage.

ABSTRACT

A new closed-loop vertical geothermal heat exchanger model is proposed for use within the TRNSYS environment. Two main features distinguish this model from other models. It allows the study of borefields where the spatial position of each borehole is defined by the user and where two independent borehole networks can be modeled (one working in charge mode while the other one is in discharge mode, for example). The proposed model relies on the finite-line source method coupled with spatial and temporal superposition techniques to represent the unsteady heat transfer process occurring in the ground. The proposed model is successfully validated by comparison with seven experimental cases. In addition, its results are compared to those of the DST model.

In another part of this study, the calculation methods from a reference model, the DST model, are brought to light. The limitations of the DST model are demonstrated by comparison to the proposed model. The DST model is inappropriate when the boreholes to be modeled are not uniformly placed around the center axis of the storage volume. In addition, a problem of discontinuity in the evolution of the calculated fluid outlet temperature from the DST model is also shown. A brief section explains how the DST model source code has been modified to consider configurations with two independent networks of U-tubes where each borehole contains one U-tube from each network. This modification enables to study the behavior of low temperature storage and improved thermal storage operation.

Practical applications with the proposed model and with the modified DST model are presented as part of complex heating and cooling systems of buildings using thermal storage in the ground with solar recharging. The proposed model is also used to model the four pipes forming the two U-tubes inside a single borehole where each U-tube is part of an independent network.

This study demonstrates that the proposed model correctly simulates the evolution of the fluid temperature at the outlet of a geothermal heat exchanger. Thus, it is recommended to use the proposed model instead of the DST model, especially when the boreholes to be modeled are not uniformly distributed around the center axis of the storage volume.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVIII
LISTE DES ANNEXES	XXIII
INTRODUCTION.....	1
1.1 Objectifs de cette étude	2
1.2 Organisation de ce mémoire.....	2
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Stockage thermique	3
1.3 Modélisation d'un puits géothermique	6
CHAPITRE 2 GÉNÉRALITÉS.....	9
2.1 Introduction	9
2.2 Échangeur géothermique vertical en boucle fermée	10
2.2.1 Essai de réponse thermique	14
2.2.2 Effets thermiques de l'écoulement de l'eau souterraine.....	16
2.3 Capteurs solaires	17
2.4 Pompes à chaleur.....	20

2.5	Chauffage auxiliaire	23
2.6	Réservoirs de stockage de courte durée	23
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU MODÈLE DST		24
3.1	Introduction	24
3.2	Notions de base sur TRNSYS	24
3.2.1	Le <i>proforma</i> sous TRNSYS	25
3.3	Modèle DST	25
3.3.1	Géométrie de l'échangeur géothermique	27
3.3.2	Maillage <i>Subregion</i>	30
3.3.3	Maillage <i>Global</i>	32
3.3.4	Maillages <i>Local</i>	33
3.3.5	Conditions frontières et initiales	35
3.3.6	Détermination des pas de temps	36
3.3.6.1	Problème <i>Local</i>	36
3.3.6.2	Problème <i>Global</i>	37
3.3.7	Résistance thermique d'un puits	37
3.3.7.1	Résistance thermique du puits sans interaction thermique entre les tuyaux, R_b^*	38
3.3.7.2	Résistance thermique du puits avec interaction thermique entre les tuyaux, R_b	43
3.3.8	Méthode de résolution du problème de transfert de chaleur	45
3.3.9	Étapes de calculs	46
3.3.9.1	Selon le pas de temps court dtr	46
3.3.9.2	Selon le pas de temps long dt	47

3.3.10	Problème Steady flux	49
3.3.11	Température moyenne du volume de stockage	49
3.4	Modèle DST modifié.....	50
3.5	Résumé.....	52
CHAPITRE 4	DESCRIPTION DU MODÈLE PROPOSÉ.....	53
4.1	Introduction	53
4.2	Type272.....	53
4.2.1	Source linéique finie.....	54
4.2.2	Solutions dérivées de la source linéique finie	56
4.2.3	Application du principe de superposition.....	58
4.2.3.1	Interactions entre plusieurs puits.....	58
4.2.3.2	Taux de transfert de chaleur variable	58
4.2.4	Résistance thermique d'un puits	61
4.2.5	Réseaux de puits.....	61
4.2.6	Emplacement des puits et des nœuds supplémentaires	62
4.2.7	Configuration des puits	62
4.2.8	Température non perturbée du sol.....	64
4.2.9	Étapes de calculs	66
4.2.9.1	Phase d'initialisation d'un projet ($t = 0$)	66
4.2.9.2	Phase de simulation d'un projet ($t > 0$).....	66
4.3	Résumé.....	69
CHAPITRE 5	VALIDATION DU MODÈLE PROPOSÉ.....	70
5.1	Introduction	70
5.2	Cas no.1 – Essai de réponse thermique à charge constante – 1 puits.....	73

5.3	Cas no.2 – Essai de réponse thermique à charge variable – 1 puits	75
5.4	Cas no.3 – Système en opération – 3 puits	78
5.5	Comparaison interlogicielle – 19 puits	81
5.5.1	Résultats	85
5.6	Résumé	89
CHAPITRE 6 APPLICATIONS		90
6.1	Introduction	90
6.2	Hypothèses	90
6.3	Application no.1 (projet Downsview)	90
6.3.1	Opération générale du système	92
6.3.2	Programme de simulation et modélisation de l'échangeur géothermique	93
6.3.3	Séquence de contrôle durant l'opération du système	93
6.3.4	Capteurs solaires	94
6.3.5	Charges de chauffage et de climatisation	95
6.3.6	Réglages du <i>proforma</i> du Type272	97
6.3.7	Résultats	99
6.4	Application no.2 (projet Drake Landing - Okotoks)	107
6.4.1	Programme de simulation et modélisation de l'échangeur géothermique	108
6.4.2	Caractéristiques de l'échangeur géothermique	108
6.4.3	Réseau de décharge	109
6.4.4	Réseau de charge	110
6.4.5	Résultats	111
6.5	Application no.3 (quatre tuyaux dans un puits)	115
6.5.1	Réglages du <i>proforma</i> du Type272 pour l'application no.3	116

6.5.2	Résultats	118
6.6	Résumé	120
CONCLUSION		121
6.7	Contributions de la présente étude	121
6.8	Recommandations	124
BIBLIOGRAPHIE		125

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1:	Caractéristiques techniques de trois projets d'échangeurs géothermiques avec stockage saisonnier.....	4
Tableau 5.1:	Synthèse des données utilisées pour valider les résultats du Type272.	73
Tableau 5.2:	Écarts calculés à partir de données numériques tirées du cas no.1 et les résultats du Type272 (Type272 - cas no.1).	74
Tableau 5.3:	Synthèse des données utilisées pour valider les résultats du Type272.	76
Tableau 5.4:	Synthèse des données utilisées pour valider les résultats du Type272.	78
Tableau 5.5:	Caractéristiques de l'échangeur géothermique présenté à la Figure 5.7.....	82
Tableau 5.6:	Longueur de puits associée à chaque Subregion.	84
Tableau 6.1:	Caractéristiques de l'échangeur géothermique.	92
Tableau 6.2:	Charges de chauffage (+) et de climatisation (-) au sol.....	96
Tableau 6.3:	Variables de l'onglet <i>Parameter</i> du <i>proforma</i> du Type272.....	97
Tableau 6.4:	Variables de l'onglet <i>Input</i> du <i>proforma</i> du Type272.	98
Tableau 6.5:	Principales caractéristiques du système de stockage d'énergie solaire par puits géothermique à double tubes en U.	109
Tableau 6.6:	5 ^{ième} année – Sommaire des résultats annuels – Comparaison entre le système alternatif à double tubes en U proposé selon deux types d'alimentation des puits et le cas Okotoks*.	114
Tableau 6.7:	Variables de l'onglet <i>Parameter</i> du <i>proforma</i> du Type272.....	116
Tableau 6.8:	Variables de l'onglet <i>Input</i> du <i>proforma</i> du Type272.	117
Tableau 6.9:	Température du fluide à l'entrée et à la sortie et température au rayon externe des tuyaux après 10 heures.....	118

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1:	Cas Anneberg : bilan thermique attendu du stockage après 5 ans d’opération (reproduction autorisée par Elsevier, 2009).	5
Figure 2.1:	Système classique d'échangeur géothermique vertical en boucle fermée servant au stockage de l'énergie solaire.	9
Figure 2.2:	Représentation schématique d'un profil de température typique dans le sol. Le gradient géothermique est exagéré pour l'illustration.	11
Figure 2.3:	Conductivité thermique de sols et de roches incluant différents degrés de saturation.	13
Figure 2.4:	Diffusivité thermique de sols et roches incluant différents degrés de saturation... ..	13
Figure 2.5:	Capteur solaire plan vitré utilisé dans les systèmes de stockage saisonnier.	17
Figure 2.6:	Courbes de rendement de trois capteurs solaires thermiques soumis à un rayonnement incident global de $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	19
Figure 2.7:	Circuit interne d'une pompe à chaleur.....	20
Figure 2.8:	Cycle thermodynamique idéal par compression d'un fluide frigorigène.....	21
Figure 3.1:	Fenêtre du studio TRNSYS version 16.01.0002.	25
Figure 3.2:	Localisation de l'échangeur géothermique dans le sol et paramètres géométriques associés au volume de stockage.....	28
Figure 3.3:	Disposition de 19 puits ($6n+1$ avec $n = 3$) selon un arrangement hexagonal entre eux et hexagonal au global.	29
Figure 3.4:	Représentation schématique de l'ordre de numérotation des <i>Subregion</i> couvrant le volume de stockage.	31
Figure 3.5:	Un maillage <i>Subregion</i> composé de trois régions radiales et cinq régions verticales pour un total de quinze <i>Subregion</i> (à gauche). Le maillage <i>Global</i> construit à partir du maillage <i>Subregion</i> (à droite).....	33
Figure 3.6:	Représentation schématique de la géométrie d'un maillage <i>Local</i>	34

Figure 3.7:	Paramètres géométriques associés à la <i>Subregion</i> 8.	35
Figure 3.8:	Puits contenant quatre tubes en U (huit tuyaux répartis uniformément autour du centre du puits) (à gauche). Modélisation effectuée par le modèle DST (à droite)..	38
Figure 3.9:	Représentation du problème de transfert de chaleur dans un puits.	39
Figure 3.10:	Paramètres menant au calcul de R_{p_i} pour un tuyau dans un puits.	41
Figure 3.11:	Méthode par différence finie pour le problème de conduction dans le sol, sur une maille <i>Global</i> de position $x = i$ et $y = j$	45
Figure 3.12:	Périodes d'échange de chaleur entre les maillages <i>Local</i> et le maillage <i>Global</i> . Exemple où $dt = (t_{Fo=0.2}) / 5$	47
Figure 3.13:	Température du fluide à la sortie du volume de stockage calculée par le modèle DST. Les discontinuités sont encerclées.	48
Figure 4.1:	Géométrie considérée par le modèle de la ligne source finie.....	54
Figure 4.2:	Exemple de profil de taux de transfert de chaleur variable (à gauche) adapté selon le principe de superposition (à droite).	59
Figure 4.3:	Représentation schématique de la méthode MLAA.....	60
Figure 4.4:	Exemple de configuration possible des puits et de nœuds supplémentaires selon le Type272.....	63
Figure 4.5:	Exemple de configuration de puits qui ne peut être modélisée avec le Type272. .	63
Figure 4.6:	Exemple de l'évolution de la température non perturbée du sol en fonction de la profondeur et du jour de l'année (où le jour 0 correspond au 1 ^{er} janvier).	65
Figure 5.1:	Température du fluide pour le cas no.1 et selon le Type272.	73
Figure 5.2:	Température du fluide pour le cas no.2 et selon le Type272.	76
Figure 5.3:	Écart de la température du fluide à la sortie du puits entre les résultats du Type272 et les données du cas no.2.....	77

Figure 5.4:	Charge horaire (climatisation) à l'échangeur géothermique pour la journée du 8 septembre 2005.....	79
Figure 5.5:	Température horaire du fluide à la sortie du groupe des trois puits pour la journée du 8 septembre 2005.....	79
Figure 5.6:	Température moyenne mensuelle du fluide à la sortie du groupe des trois puits sur une période de 16 mois.....	80
Figure 5.7:	Vue du dessus de l'échangeur géothermique formé de 19 puits (numérotés de 1 à 19), selon une configuration hexagonale.....	81
Figure 5.8:	Une région radiale et dix régions verticales formant un maillage <i>Subregion</i> à dix <i>Subregion</i>	83
Figure 5.9:	Profil annuel de la température du fluide à l'entrée du volume de stockage.....	85
Figure 5.10:	Température du fluide à la sortie de l'échangeur géothermique formé de 19 puits alimentés en parallèle, sur une période de 20 ans.....	87
Figure 5.11:	Écart de la température du fluide à la sortie du volume de stockage entre les résultats du Type272 et du modèle DST, sur une période de 20 ans.....	87
Figure 5.12:	Écart sur le taux de transfert de chaleur transmis au sol (chauffage ⁺ et refroidissement ⁻) entre les résultats du Type272 et du modèle DST, sur une période de 20 ans.....	88
Figure 5.13:	Écart entre la température du fluide à la sortie du puits no.1 et du puits no.14 pour le Type272, sur une période de 20 ans.....	88
Figure 6.1:	Alimentation des deux réseaux de puits indépendants (à gauche). Vue du dessus de la répartition des puits dans l'échangeur géothermique selon la configuration 9/16 (à droite).	91
Figure 6.2:	Représentation schématique du système de stockage d'énergie solaire par puits géothermique.....	91
Figure 6.3:	Organigramme logique de la séquence de contrôle implantée dans TRNSYS.....	94

Figure 6.4:	Rendement des capteurs solaires en fonction de la différence de température entre le fluide à l'entrée des capteurs et l'air extérieur.....	95
Figure 6.5:	Fichier texte contenant les coordonnées du centre des puits pour les deux réseaux indépendants.	99
Figure 6.6:	Température du fluide à la sortie des 9 puits du centre, également à l'entrée de la PAC-1 ou des capteurs solaires, sur une période de 5 ans – aucune injection solaire.....	100
Figure 6.7:	Température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie, également à l'entrée des PAC-2 et PAC-3, sur une période de 5 ans – aucune injection solaire.	100
Figure 6.8:	Température du fluide à la sortie des 9 puits du centre, également à l'entrée de la PAC-1 ou des capteurs solaires, sur une période de 5 ans – 200 m ² de capteurs.....	102
Figure 6.9:	Température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie, également à l'entrée des PAC-2 et PAC-3, sur une période de 5 ans – 200 m ² de capteurs.	102
Figure 6.10:	Température moyenne du sol entourant les 25 puits de l'échangeur géothermique...	104
Figure 6.11:	Température moyenne du sol en $y = 16$ m.	104
Figure 6.12:	Température moyenne du sol selon l'encadré de la Figure 6.10.	105
Figure 6.13:	Température moyenne du sol selon l'encadré de la Figure 6.12.	106
Figure 6.14:	Représentation schématique du système avec le BTES à double tubes en U par puits, formant deux réseaux de conduites indépendantes.....	107
Figure 6.15:	COP des pompes à chaleur en mode chauffage.	110
Figure 6.16:	Évolution de la température moyenne du sol composant le BTES et comparatif avec une alimentation en parallèle des puits.	111
Figure 6.17:	Température du fluide à la sortie du réseau de décharge, également à l'entrée des PAC.	112

Figure 6.18:	État du système à l'heure 20 579 (durant le mois de mai de la 3 ^{ième} année de simulation).	113
Figure 6.19:	Bilan d'énergie mensuel pour la 5 ^{ième} année.....	114
Figure 6.20:	Fichier texte contenant les coordonnées du centre des quatre tuyaux.....	117
Figure 6.21:	Disposition des tuyaux no.1 à 4 dans le puits.	117
Figure 6.22:	Température moyenne du sol entourant les quatre tuyaux et température moyenne du fluide circulant dans les quatre tuyaux à l'intérieur d'un puits, après 10 heures....	118
Figure 6.23:	Température du fluide à la sortie de chacun des quatre tuyaux.	119

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BTES	Borehole thermal energy storage
COP	Coefficient de performance d'une pompe à chaleur
PAC	Pompe à chaleur
RMS	Root mean square
TRNSYS	Transient systems simulation program
r, θ, z	Coordonnées cylindriques (m)
x, y, z	Coordonnées cartésiennes (m)
c_g	Chaleur spécifique du sol ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
$c_{p,f}$	Chaleur spécifique d'un fluide à pression constante ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
D	Profondeur de la tête des puits depuis la surface du sol (m)
G	Rayonnement solaire incident total (direct et diffus) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
H	Longueur d'un puits (m)
i	Gradient hydraulique ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)
K	Conductivité hydraulique du sol ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
\dot{m}_f	Débit massique de fluide ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
q	Taux de transfert de chaleur (W)
q'	Taux de transfert de chaleur par unité de longueur ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$)
q''	Flux de chaleur ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
q_r	Taux de transfert de chaleur selon la direction r (W)
q_z	Taux de transfert de chaleur selon la direction z (W)

q_d	Taux de transfert de chaleur moyen durant l'intervalle Δt_d , selon la méthode MLAA (W)
q_w	Taux de transfert de chaleur moyen durant l'intervalle Δt_w , selon la méthode MLAA (W)
q_m	Taux de transfert de chaleur moyen durant l'intervalle Δt_m , selon la méthode MLAA (W)
q_y	Taux de transfert de chaleur moyen durant l'intervalle Δt_y , selon la méthode MLAA (W)
r	Distance radiale (m)
r_b	Rayon d'un puits (m)
R_b	Résistance thermique d'un puits ($\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$)
t	Temps (s)
Δt_h	Premier intervalle de temps passé, où les charges ne sont pas agrégées, selon la méthode MLAA (s)
Δt_d	Deuxième intervalle de temps passé, où les charges sont agrégées, selon la méthode MLAA (s)
Δt_w	Troisième intervalle de temps passé, où les charges sont agrégées, selon la méthode MLAA (s)
Δt_m	Quatrième intervalle de temps passé, où les charges sont agrégées, selon la méthode MLAA (s)
Δt_y	Cinquième intervalle de temps passé, limité par le début d'une simulation, où les charges sont agrégées, selon la méthode MLAA (s)
T_g	Température non perturbée du sol ($^{\circ}\text{C}$)
T_b	Température au rayon d'un puits ($^{\circ}\text{C}$)

T_0	Température moyenne à la surface du sol (°C)
T_1	Demi-amplitude de la variation annuelle de température à la surface du sol (°C)
T_f	Température du fluide (°C)
$T_{f,in}$	Température du fluide à l'entrée d'un élément (°C)
$T_{f,out}$	Température du fluide à la sortie d'un élément (°C)
$T_{f,moy}$	Température moyenne du fluide des puits géothermiques (°C)
T_{ext}	Température de l'air extérieur (°C)
T_{EWT}	Température du fluide à l'entrée de la pompe à chaleur (°C)
z	Profondeur depuis la surface du sol (m)

Lettres grecques

α_g	Diffusivité thermique du sol ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
γ	Constante d'Euler-Mascheroni
η_{capteur}	Rendement d'un capteur solaire (-)
λ_b	Conductivité thermique du coulis de remplissage d'un puits ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
λ_g	Conductivité thermique du sol ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
λ_p	Conductivité thermique du matériau composant les tuyaux ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
ρ_g	Masse volumique du sol ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
ρ_f	Masse volumique du fluide ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

ATTRIBUABLES AU MODÈLE DST SEULEMENT

DST	Duct ground heat storage model
$A_{c.s.}$	Aire d'une section perpendiculaire (m ²)
B	Espacement entre les puits (m)
$c_{p_{i,j}}$	Chaleur spécifique de la maille <i>Global</i> de position $x = i$ et $y = j$ (J·m ⁻³ ·°C ⁻¹)
dt	Pas de temps du problème <i>Global</i> (s)
dtr	Pas de temps du problème <i>Local</i> (s)
dt_{TRNSYS}	Pas de temps du studio TRNSYS (s)
E_{k,dt_i}	Énergie échangé entre le fluide et un maillage <i>Local</i> k durant le pas de temps dt de position i dans le temps (J)
Fo	Nombre de Fourier, $(\alpha_g t / r_1^2)$ (-)
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
$IMAXR$	Numéro de la dernière maille <i>Local</i> associée à un volume de sol, selon r
$IMAX$	Numéro de la dernière maille <i>Global</i> associée à un volume de sol, selon r
$JMAX$	Numéro de la dernière maille <i>Global</i> associée à un volume de sol, selon z
J	Conductance thermique (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
L_{gap}	Épaisseur de l'espacement d'air ou d'eau entre un tuyau et le matériau de remplissage d'un puits (coulis) (m)
L_{Sub_k}	Longueur de puits attribuée à la <i>Subregion</i> k (m)
$\dot{m}_{f,tot}$	Débit massique de fluide total circulant dans l'échangeur géothermique (kg·s ⁻¹)
$\dot{m}_{f,1 \text{ puits}}$	Débit massique de fluide circulant dans un puits (kg·s ⁻¹)
NBH_{tot}	Nombre de puits d'un échangeur géothermique (-)

$NLOC$	Nombre de <i>Subregion</i> dans un volume de stockage (-)
$q_{Loc_k, R0}$	Taux de transfert de chaleur appliqué en r_0 dans le maillage <i>Local k</i> (W)
$r_{Loc_k, i}$	Rayon interne de la maille <i>Local</i> de position $r = i$ dans le maillage <i>Local k</i> (m)
$\bar{r}_{Loc_k, i}$	Rayon moyen de la maille <i>Local</i> de position $r = i$ dans le maillage <i>Local k</i> (m)
$r_{RR, int}$	Rayon interne d'une région radiale (m)
$r_{RR, ext}$	Rayon externe d'une région radiale (m)
R_b^*	Résistance thermique d'un puits sans l'effet de R_a ($m \cdot K \cdot W^{-1}$)
R_a	Résistance thermique entre les tuyaux d'un puits ($m \cdot K \cdot W^{-1}$)
r_0	Rayon d'un puits et frontière interne d'un maillage <i>Local</i> (m)
r_1	Rayon de la fraction du volume de stockage attribuable à un puits et frontière externe d'un maillage <i>Local</i> (m)
r_{BTES}	Rayon du volume de stockage (BTES) d'un l'échangeur géothermique (m)
$t_{Fo=0.2}$	Temps correspondant à un nombre de Fourier égal à 0.2 (s)
T_{b_k}	Température au rayon de la longueur de puits, L_{Sub_k} de la <i>Subregion k</i> ($^{\circ}C$)
$T_{i, j}$	Température de la maille <i>Global</i> de position $x = i$ et $y = j$ ($^{\circ}C$)
$T_{Loc_k, i}$	Température de la maille <i>Local</i> de position $r = i$ dans le maillage <i>Local k</i> ($^{\circ}C$)
T_{Sub_k}	Température moyenne des mailles <i>Global</i> associées à la <i>Subregion k</i> ($^{\circ}C$)
V_{BTES}	Volume cylindrique de stockage de l'échangeur géothermique (m^3)
$V_{i, j}$	Volume représenté par la maille <i>Global</i> de position $x = i$ et $y = j$ (m^3)
$\rho_{i, j}$	Masse volumique de la maille <i>Global</i> de position $x = i$ et $y = j$ ($kg \cdot m^{-3}$)

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – Références informatiques	132
ANNEXE 2 – Organigramme des sous-routines du modèle DST	133
ANNEXE 3 – Modélisation par le modèle DST d'un échangeur géothermique formé de deux puits	136
ANNEXE 4 – Valeurs typiques de R_b^* , R_b et R_a selon la méthode de calcul du modèle DST.....	151
ANNEXE 5 – Organigramme des sous-routines du Type272	156
ANNEXE 6 – Guide d'utilisation du Type272.....	158
ANNEXE 7 – Autres validations du Type272	164
ANNEXE 8 – Effet de la variation de la diffusivité thermique – Type272	168

INTRODUCTION

En raison de considérations économiques et environnementales, l'énergie géothermique et l'énergie solaire se présentent de plus en plus comme des alternatives renouvelables face aux autres formes d'énergies utilisées pour le chauffage et la climatisation des bâtiments.

Les systèmes géothermiques utilisant des pompes à chaleur pour le chauffage et la climatisation des bâtiments sont généralement couplés à des échangeurs de chaleur géothermique verticaux en boucle fermée. Le fonctionnement de ces systèmes est relativement simple. Un fluide caloporteur est pompé à travers une série de puits verticaux dont l'ensemble forme l'échangeur géothermique. La chaleur puisée (ou rejetée) est acheminée par le fluide à une pompe à chaleur pour le chauffage (climatisation) des bâtiments. Le dimensionnement d'un échangeur géothermique repose sur le maintien d'un état thermique du sol, année après année, permettant de répondre aux besoins en chauffage et en climatisation des bâtiments. Lorsque les charges de chauffage surpassent les charges de climatisation pour un bâtiment, comme c'est souvent le cas dans les régions caractérisées par un climat frais en été et froid en hiver, la portion de l'échangeur géothermique attribuable au déséquilibre entre les charges de chauffage et de climatisation est inutilisée durant les périodes de climatisation.

Dans le but d'optimiser l'utilisation d'un échangeur géothermique dont la taille est déterminée principalement par les besoins en chauffage, il peut être souhaitable d'y connecter un système externe de recharge thermique. Puisque les périodes où les besoins en chauffage diminuent correspondent généralement aux périodes où l'énergie solaire est plus abondante, l'idée d'utiliser l'énergie solaire comme source de recharge thermique du sol apparaît comme une solution au problème. De manière simplifiée, le concept du stockage saisonnier par puits géothermiques consiste à stocker dans le sol l'énergie solaire captée durant l'été et à la redistribuer aux bâtiments durant l'hiver. L'utilisation de l'échangeur géothermique est alors maximisée (optimisée) et ses dimensions réduites par rapport à un système sans stockage thermique saisonnier.

La conception d'un système géothermique passe par l'utilisation d'outils de modélisation permettant la simulation de son utilisation dans le temps.

1.1 Objectifs de cette étude

L'objectif premier de ce travail est le développement (dans l'environnement TRNSYS) et la validation d'un nouveau modèle d'échangeur géothermique vertical en boucle fermée. Le cahier des charges de ce nouvel outil comprend les éléments suivants : le positionnement spatial de chaque puits doit être possible ainsi que le raccordement par branches de puits en série; la température moyenne sur la longueur d'un puits en n'importe quel point du sol ainsi que le calcul de la température du fluide à la sortie de chaque puits doit être évaluée; l'application de charges thermiques variables dans un ou deux réseaux indépendants de puits doit être possible.

Un autre objectif important de cette étude est l'ingénierie inverse du modèle DST, un modèle de référence dans le domaine, dont le fonctionnement interne est généralement mal compris à ce jour.

1.2 Organisation de ce mémoire

Ce mémoire est divisé en 6 chapitres. Le Chapitre 1 expose une revue de la littérature propre aux systèmes de stockage saisonnier par puits géothermiques verticaux en boucle fermée et présente les méthodes classiques de modélisation d'un puits géothermique. Le Chapitre 2 introduit le lecteur aux différents aspects et composantes associés aux échangeurs géothermiques. Le Chapitre 3 débute par une brève introduction au programme TRNSYS et présente ensuite l'ingénierie inverse du modèle DST et une proposition de modification au modèle DST. Le Chapitre 4 détaille les considérations théoriques relatives au modèle proposé. Au Chapitre 5, les résultats du modèle proposé sont comparés aux données de trois cas expérimentaux et aux résultats du modèle DST pour un champ formé de 19 puits. Finalement, le Chapitre 6 présente trois applications, dont deux sur le stockage thermique avec recharge solaire et une sur la modélisation de chaque tuyau à l'intérieur d'un puits.

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Ce chapitre présente quelques-uns des travaux marquants du domaine du stockage thermique saisonnier par puits géothermique ainsi qu'une brève revue des principales méthodes de modélisation d'un puits géothermique. D'autres travaux, notamment ceux ayant trait au modèle DST, seront passés en revue de façon plus approfondie dans les chapitres suivants.

1.2 Stockage thermique

Par convention, un échangeur de chaleur géothermique vertical en boucle fermée destiné au stockage thermique saisonnier est le plus souvent décrit par l'acronyme BTES (*Borehole Thermal Energy Storage*) dans la littérature.

Le principal ouvrage de référence relevant les lignes directrices du stockage saisonnier de chaleur et servant de guide pour les concepteurs est attribuable à Hadorn (1988). Ce document expose les diverses techniques, tel le stockage en cuves, en bassin, en cavernes, en lacs, par aquifères et par échangeurs géothermiques verticaux ou horizontaux, permettant le stockage saisonnier. Pahud (2000, 2002) présente également de l'information générale sur l'énergie géothermique et le stockage thermique et quelques méthodes de calcul ciblant précisément le dimensionnement d'un BTES sont présentées.

Schmidt et al. (2004) retracent l'historique du développement des projets de stockage saisonnier par recharge solaire en passant en revue les plus grands sites d'Europe. Les auteurs exposent également une synthèse des techniques de conception.

Trillat-Berdal (2006) et Trillat-Berdal et al. (2006) ont étudié la recharge solaire du sol pour un système de puits géothermique et de pompes à chaleur pour le chauffage et la climatisation d'une résidence de 180 m². Leurs études comportent des simulations avec le programme TRNSYS (Klein et al., 2004) et le modèle d'échangeur géothermique DST (Claesson et al., 1981) sur une période de 20 ans ainsi que des mesures expérimentales durant une période de 18 mois. Les résultats de leurs simulations montrent qu'à long terme, un système géothermique intégrant en partie l'énergie solaire pour la recharge du sol est difficilement justifiable pour un seul bâtiment de type résidentiel puisque la variation de la consommation d'énergie de la pompe à chaleur

reliée à l'échangeur géothermique est améliorée de seulement 3 % après 20 ans d'opération du système. Ces résultats sont en accord avec ceux de Bernier et Salim Shirazi (2007) qui concluent qu'il n'y a pas davantage significatif à faire de la recharge solaire pour les systèmes à un seul puits.

Le Tableau 1.1 présente une série de données techniques concernant trois projets de BTES actuellement en opération et pour lesquels un processus scientifique de suivi des activités et des performances a été engagé.

Tableau 1.1: Caractéristiques techniques de trois projets d'échangeurs géothermiques avec stockage saisonnier.

Projet (Lieu)	Okotoks (Canada)	Anneberg (Suède)	Neckarsulm (Allemagne)
Recensement des données	2007	2007	2007
Bâtiments à alimenter	52 maisons unifamiliales	50 maisons unifamiliales	300 unités de logement, 1 école et 1 centre d'achat
Volume de stockage saisonnier	30 000 m ³	60 000 m ³	63 360 m ³
Nombre de puits	144	100	528
Longueur des puits	35 m	65 m	30 m
Espacement des puits	2.25 m	3 m	non spécifié
 Tubes en U par puits	1	2	2
Volume de stockage court terme (eau)	240 m ³	non	200 m ³
Pompe à chaleur	non	oui	non
Superficie des capteurs solaires thermiques	2 293 m ²	2 400 m ²	5 670 m ²
Énergie solaire collectée annuellement par les capteurs solaires thermiques	1 134 MW·h*	1 075 MW·h*	1 854 MW·h**
Énergie injectée annuellement dans le BTES	573 MW·h*	1 075 MW·h*	532 MW·h**
Énergie perdue annuellement par le BTES	347 MW·h*	500 MW·h*	non spécifié
Température moyenne annuelle du BTES	non spécifiée, 80 °C à la fin de l'été*	30-45 °C*	50 °C** (85 °C*)

*Valeurs attendues en régime permanent de fonctionnement (3 à 8 ans après la mise en route du système).

**Valeurs atteintes avant le régime permanent de fonctionnement.

Le cas d'Anneberg (Suède) est évalué par Lundh et Dalenback (2008). Ce cas a préalablement été modélisé par Nordell et Hellström (2000) selon deux programmes de simulation: MINSUN

(Mazzarella, 1991) et TRNSYS (Klein et al. 2004). Le bilan thermique mensuel attendu après 5 ans est donné à la Figure 1.1. Ces résultats sont typiques du comportement d'un système de stockage saisonnier par BTES. Ainsi, tel que montré à la Figure 1.1, le stockage dans les puits (identifié par *To bh*) se fait majoritairement en été. Ceci accroît la température du stockage et entraîne des pertes thermiques du volume de sol associé au BTES (identifié par *Losses*) relativement importantes. Par exemple, au mois de juillet, les capteurs solaires permettent de stocker 200 MWh alors que les pertes sont de l'ordre de 75 MWh (soit 38 % de ce qui est stocké). En hiver, l'énergie requise au chauffage des résidences est puisée du BTES. Ainsi, en janvier, environ 75 MWh sont puisés (identifié par *From bh*) du stockage. Étant donné que la température moyenne du stockage a diminué, les pertes thermiques du stockage sont réduites à environ 20 MWh. Il est à noter que les pertes thermiques dans le réseau de distribution (*Distr* sur la Figure 1.1) sont relativement faibles.

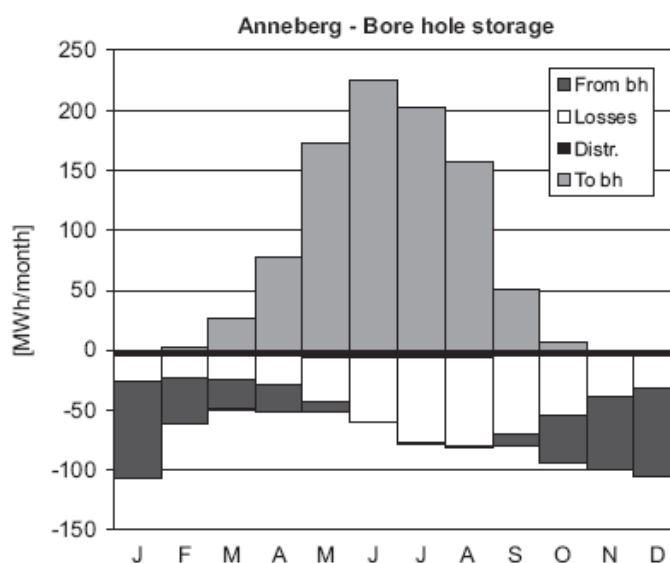


Figure 1.1: Cas Anneberg : bilan thermique attendu du stockage après 5 ans d'opération (reproduction autorisée par Elsevier, 2009).

Le cas Neckarsulm est documenté par Nussbicker et al. (2004) et pour les données plus récentes par Nussbicker (2009). Ce projet a débuté en 1995 et devrait être complété d'ici 2010 alors que les bâtiments tirent une partie de leurs besoins en chauffage du stockage saisonnier depuis 1997. L'énergie solaire est directement utilisée ou stockée dans le BTES. En 2007, 45 % des besoins

totaux en chauffage (espaces et eau chaude) de l'ensemble des bâtiments étaient comblés par le système de stockage couplé aux capteurs solaires.

Le cas Okotoks est documenté par Sibbit et al. (2007). Tel qu'indiqué au Tableau 1.1, en régime annuel permanent d'opération, le BTES devrait subir une perte thermique annuelle correspondant à environ 60 % de l'énergie injectée dans le BTES. La disposition des puits dans le BTES ainsi que leur raccordement ont été faits de manière à améliorer la stratification radiale thermique du volume de sol associé au BTES. La stratification radiale à l'intérieur du BTES permet de mieux conserver la chaleur injectée par la formation d'une zone chaude au centre et d'une zone froide en périphérie du BTES. Le chauffage des bâtiments se fait à partir du centre du BTES tandis que les capteurs solaires sont alimentés à partir de la périphérie. Le BTES est formé de 24 branches comportant 6 puits géothermiques connectés en série pour un total de 144 puits. Chaque branche de 6 puits est disposée de manière à rayonner entre le centre et la périphérie du BTES. En mode de recharge du BTES, le fluide chaud provenant des capteurs solaires entre dans les puits situés au centre du BTES puis progresse, tout en cédant progressivement sa chaleur au sol, à travers les 24 branches vers la périphérie du BTES. En mode de décharge du BTES, lors de l'alimentation des bâtiments, le phénomène inverse est établi en inversant le sens de l'écoulement du fluide dans les 24 branches de 6 puits.

1.3 Modélisation d'un puits géothermique

La modélisation d'un puits géothermique se fait généralement par l'utilisation d'une seule ou d'une combinaison des méthodes suivantes:

- méthode analytique de la source linéique infinie;
- méthode analytique de la source cylindrique;
- méthode analytique de la source linéique finie;
- méthode numérique par volumes finis ou éléments finis; et
- méthode suggérée par ASHRAE (*American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*).

Les méthodes de résolution par éléments finis et par volumes finis peuvent être appliquées à la modélisation d'un seul puits, mais ne sont généralement pas utilisées seules lorsqu'il y a plusieurs

puits à modéliser en raison de la lourdeur des calculs associés à ces méthodes. En effet, des simulations numériques horaires sur 20 ans en 3-D ne sont pas réalisables en pratique.

La méthode de la source linéique infinie est présentée par Ingersoll (1948) suivant les travaux de Lord Kelvin (1882) sur la conduction thermique. La méthode de la source cylindrique se retrouve également dans Ingersoll (1948) ainsi que dans Carslaw et Jaeger (1959). Le lecteur est référé au mémoire de Sheriff (2007) pour une présentation détaillée de ces deux méthodes.

La méthode par différences finies est utilisée par l'un des programmes de simulation d'échangeur géothermique le plus souvent cité dans la littérature scientifique, soit le modèle DST (*Duct ground heat Storage model*) développé initialement par Claesson et al. (1981) du département de mathématique et physique de l'Université de Lund (Suède).

ASHRAE (2003) et Kavanaugh et Rafferty (1997) suggèrent l'utilisation d'une méthode développée à partir de la méthode de la source cylindrique. Cette méthode demande le calcul de trois résistances thermiques équivalentes du sol (chaque résistance étant associée à l'application d'une charge thermique sur une certaine période de temps) dont les valeurs sont déterminées en passant par l'utilisation d'un graphique mettant en relation le nombre de Fourier et une certaine fonction dont la valeur est appelée *G-factor*.

La méthode de la source linéique finie, telle qu'exprimée par Zeng et al. (2002), est basée sur la solution du point source énoncé dans les travaux de Lord Kelvin (1882) et également dans les travaux d'Ingersoll (1948) et de Carslaw et Jaeger (1959). Lamarche et Beauchamp (2007) présentent une solution dérivée de la source linéique finie permettant de calculer la température moyenne le long d'un puits

Marcotte et al. (2010) comparent les résultats de la méthode de la source linéique finie avec ceux de la source linéique infinie dans le dimensionnement d'un échangeur géothermique.

Bernier et al. (2004) propose la méthode MLAA (*Multiple Load Aggregation Algorithm*) dans l'objectif de diminuer le temps de calcul lorsque le taux de transfert de chaleur entre un puits et le sol varie dans le temps. La méthode MLAA est applicable à la méthode de la source linéique infinie et finie et à la méthode de la source cylindrique.

Marcotte et Pasquier (2008) suggèrent l'application du produit de convolution par l'utilisation de la transformée discrète de Fourier sur la charge thermique entre un puits et le sol et sur la

fonction d'influence (source linéique finie ou infinie par exemple) afin de déterminer la variation de température causée dans le sol. Cette méthode permet de réduire d'au moins un ordre de grandeur le temps de calcul comparativement aux méthodes d'agrégation des charges comme la méthode MLAA. Les résultats obtenus par les auteurs sont exactement les mêmes que ceux obtenus en tenant compte de l'influence de chacune des charges thermiques, c'est-à-dire prise individuellement.

La méthode de la source linéique finie et la méthode MLAA sont des méthodes retenues pour le modèle développé dans le cadre de ce mémoire et présenté au Chapitre 4.

CHAPITRE 2 GÉNÉRALITÉS

2.1 Introduction

Tel que montré à la Figure 2.1, un système géothermique typique visant le stockage saisonnier par captage de l'énergie solaire est constitué des éléments suivants: échangeur géothermique vertical en boucle fermée (1), capteurs solaires (2), pompe à chaleur (3), chauffage auxiliaire (4) et réservoir de stockage de courte durée (5).

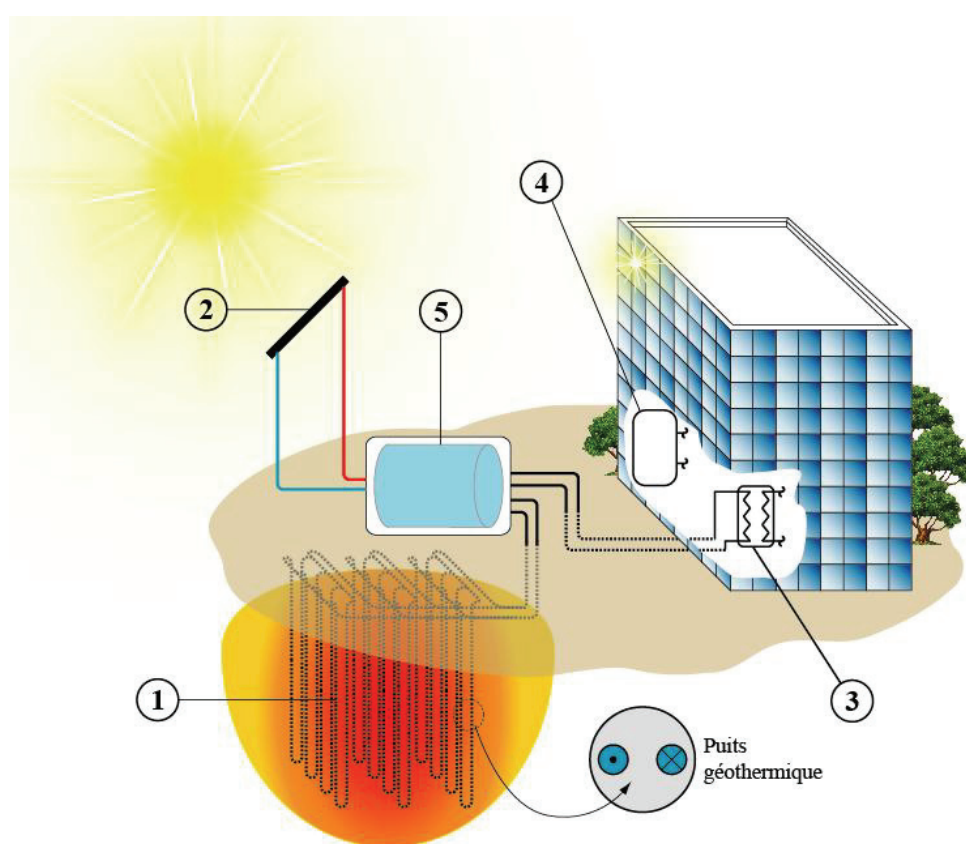


Figure 2.1: Système classique d'échangeur géothermique vertical en boucle fermée servant au stockage de l'énergie solaire.

Les sections suivantes décrivent sommairement ces différents éléments et les concepts s'y rattachant. Il est à noter que dans ce mémoire, l'expression "sol" est utilisée pour désigner l'ensemble des conditions géologiques possibles (mort-terrain, roc, etc.).

2.2 Échangeur géothermique vertical en boucle fermée

Un échangeur géothermique par puits verticaux en boucle fermée consiste en une série de puits forés dans le sol à l'intérieur desquels sont insérés un ou plusieurs tubes en U reliés en série ou en parallèle au niveau des têtes de puits. C'est de ce type d'échangeur géothermique dont il est question dans ce mémoire. Les tubes en U sont fabriqués à partir d'un plastique polyéthylène à usage géothermique et conforme à la norme CSA B137.1 au Canada. Les puits ont un diamètre et une profondeur typique variant respectivement entre 0.09 et 0.15 m et entre 30 et 200 m (Gehlin, 2002). À l'intérieur des tubes en U circule un fluide caloporteur assurant le transport d'énergie thermique vers les bâtiments. Le fluide caloporteur est généralement une solution antigel d'eau additionnée d'éthanol, de méthanol ou de propylène glycol en proportions variables, assurant un état liquide à des températures d'opération du système sous 0°C.

Dans le but de s'assurer que les tubes en U soient le plus près possible du sol, l'emploi d'espaceurs (entretoises) est souhaitable. Ceci permet également de réduire l'effet de court-circuit thermique entre les tuyaux composant les tubes en U dans un puits. L'espace entre les tuyaux et la paroi d'un puits est comblé ou non par un matériau de remblayage. Au Canada, les puits verticaux doivent être remblayés par un matériau étanche pour empêcher les infiltrations d'eau de surface potentiellement polluée et le mélange des eaux souterraines contenues dans les différentes unités géologiques traversées par le forage (Association canadienne de normalisation, 2003). En Suède et en Norvège, il est commun de laisser le puits non remblayé lorsque le niveau de la nappe phréatique est suffisamment près de la surface du sol (Gehlin, 2002). Lorsqu'un puits est remblayé, un coulis à base de sable de silice, de bentonite et de ciment en proportions variables est généralement utilisé. Ces coulis ont une conductivité thermique qui varie, principalement en fonction de la qualité et de la proportion de sable, entre 0.7 et 2.5 W·m⁻¹K⁻¹. Le coulis est généralement injecté à l'aide d'une trémie à partir de la base du puits.

Lorsque l'échangeur géothermique n'est pas destiné au stockage thermique, l'espacement entre les puits doit être suffisant pour éviter les interférences thermiques entre les puits en place. Dans ce cas, ASHRAE (2003) suggère une distance minimale entre les puits de 6 m. À l'inverse, dans le cas du stockage thermique, la chaleur doit être concentrée dans un plus petit volume pour augmenter la température d'utilisation. Dans ce cas, la distance entre les puits est diminuée à environ 2 à 4 mètres. Ceci a également pour effet de diminuer la surface de sol attribuable à

l'échangeur géothermique en contact avec le sol environnant, ce qui permet de diminuer les pertes thermiques du stockage.

Un échangeur géothermique permet de bénéficier de l'état thermique du sol pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. Sous quelques mètres de la surface (environ 6 m), la température du sol se stabilise durant l'année et ne varie plus en fonction de la température de l'air extérieur mais selon le gradient géothermique. Cette température est appelée la température non perturbée du sol, T_g . En dehors des zones volcaniques, le gradient géothermique est généralement de l'ordre de 9 à 48°C par kilomètre de profondeur (ASHRAE, 2003) tandis que la valeur de T_g est généralement proche de la température moyenne annuelle de l'air à la surface du sol.

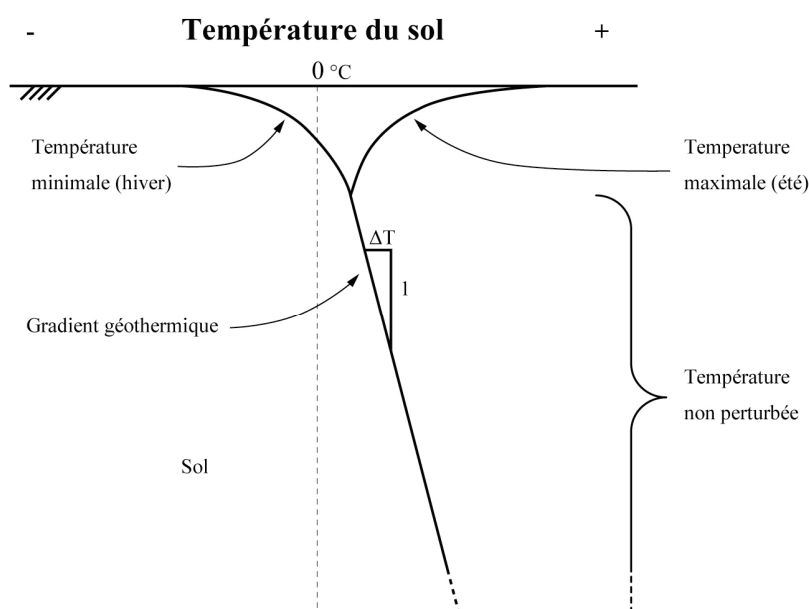


Figure 2.2: Représentation schématique d'un profil de température typique dans le sol. Le gradient géothermique est exagéré pour l'illustration.

Le dimensionnement de l'échangeur géothermique dépend également des propriétés physiques et thermiques du sol (masse volumique, conductivité thermique et chaleur spécifique). Le sol est défini comme une matrice solide contenant de l'eau et de l'air en proportions variables. Le principal mode de transfert de chaleur dans le sol s'effectue par conduction (Farouki, 1981). Selon la présence d'eau dans le sol et de sa capacité à circuler, des mouvements convectifs naturels (variation de la masse volumique de l'eau en fonction de la température) ou forcés sous l'effet d'un gradient hydraulique (écoulements gravitaires) peuvent avoir lieu et influencer de

manière significative le comportement thermique du volume de sol près de l'échangeur géothermique.

La conductivité thermique d'un sol, λ_g est une propriété caractérisant son aptitude à transférer l'énergie sous l'influence d'un gradient de température (différence de température entre 2 points). La présence d'eau dans le sol peut influencer la conductivité thermique de manière significative. Dans les sols non gelés, l'augmentation de la teneur en eau massique (masse d'eau / masse solide) impliquant le remplacement d'air par de l'eau peut augmenter, par exemple pour un sable, jusqu'à quatre fois la valeur de sa conductivité thermique (Fakouri, 1981). Outre le fait que l'eau ait une conductivité thermique environ 20 fois plus élevée que l'air, sa présence crée des ponts thermiques entre les grains solides assurant un meilleur échange de chaleur. L'effet du gel dans un sol peut accroître ou décroître sa conductivité thermique selon le degré de saturation du sol (volume d'eau / volume des vides). En dessous d'un certain degré de saturation, l'effet du gel (bien que la glace soit quatre fois plus conductrice que l'eau) peut diminuer la valeur de la conductivité thermique du sol par la réduction du nombre de points de contact entre l'eau transformée en glace et les grains solides (Kersten, 1963, cité par Fakouri, 1981).

La chaleur spécifique d'un sol, c_g est une propriété caractérisant son aptitude à emmagasiner l'énergie. Pour le stockage thermique, une chaleur spécifique du sol élevée permet de conserver l'énergie dans le sol à proximité de l'échangeur géothermique, tandis qu'une conductivité thermique élevée permet une réponse rapide du transfert de chaleur entre les puits et le sol. La diffusivité thermique d'un sol, $\alpha_g = \lambda_g / (\rho_g \cdot c_g)$, exprime le rapport entre la capacité du sol à conduire la chaleur et sa capacité à l'emmagasiner. Une diffusivité thermique élevée engendre un plus grand rayon d'influence thermique dans le sol entourant un échangeur géothermique.

Les Figures 2.3 et 2.4 présentent des gammes de valeurs de λ_g et α_g pour quelques sols et roches incluant leurs variantes selon une certaine teneur en eau, ainsi que pour l'eau seulement (Kavanaugh et Rafferty, 1997, Fakouri, 1981 et Incropera et al. 2007).

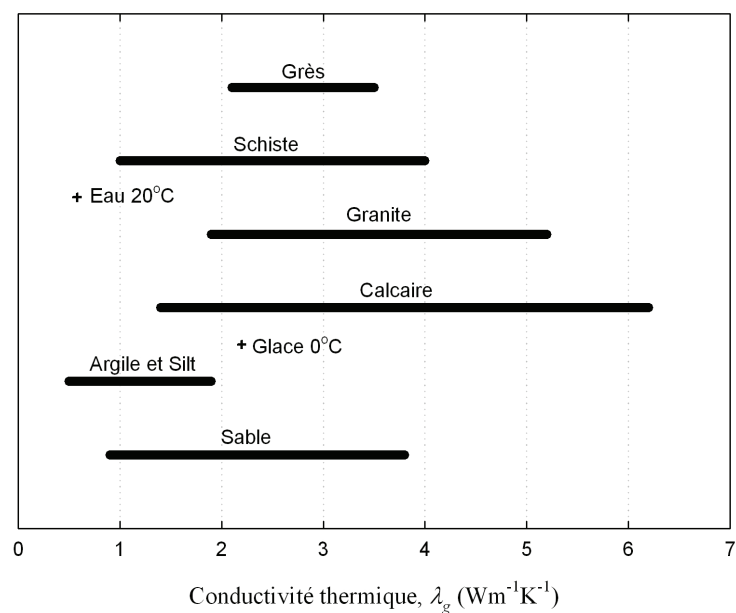


Figure 2.3: Conductivité thermique de sols et de roches incluant différents degrés de saturation.

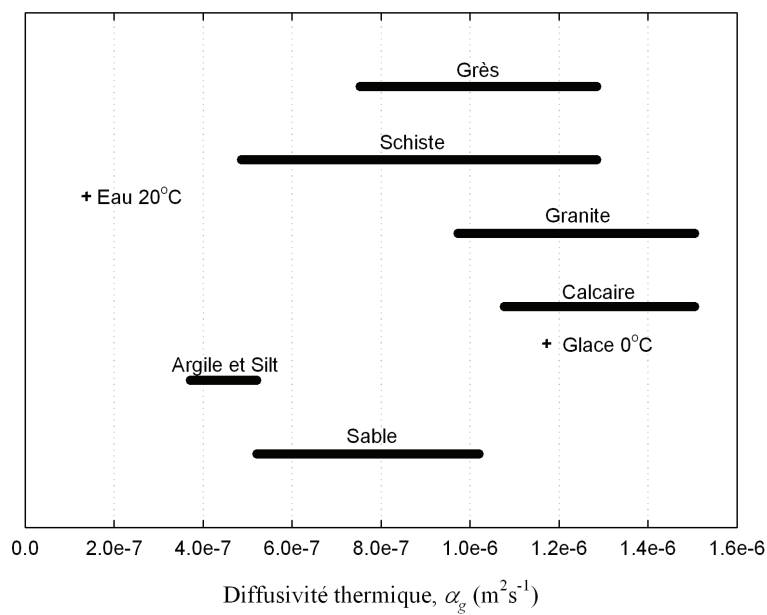


Figure 2.4: Diffusivité thermique de sols et roches incluant différents degrés de saturation.

2.2.1 Essai de réponse thermique

Un essai de réponse thermique est une opération *in situ* visant à déterminer la conductivité thermique d'un sol, λ_g la température non perturbée du sol, T_g et la résistance thermique du puits, R_b . Ces paramètres sont dits effectifs puisqu'ils sont intégrateurs de l'ensemble des hétérogénéités présentes dans le milieu où s'effectue le transfert de chaleur.

L'essai s'effectue habituellement par la circulation à débit constant d'un fluide (généralement de l'eau) dans le puits géothermique. Kavanaugh (2000) et Kavanaugh et Rafferty (1997) donnent quelques recommandations à suivre pour l'exécution d'un essai de réponse thermique. Le débit du fluide doit au moins permettre un écoulement turbulent dans les tuyaux. Pour de l'eau, le débit utilisé est de l'ordre de 0.13 à 0.19 l·s⁻¹ pour des tuyaux de 0.019 à 0.038 m de diamètre. Le fluide pompé est chauffé à un taux constant de l'ordre de 50 à 80 W par mètre de puits. L'évolution de la température du fluide à l'entrée et à la sortie du puits est mesurée sur une durée de 36 à 48 heures.

L'analyse des résultats d'un essai de réponse thermique se fait généralement par le modèle du cylindre source ou celui de la ligne source infinie, basés sur l'équation de conduction de chaleur dans le sol, tel que présenté par Sheriff (2007). Le modèle de la ligne source infinie étant plus communément utilisé, c'est celui qui sera détaillé dans cette section.

Selon la méthode de la ligne source infinie, où la ligne source est placée dans un sol homogène de température uniforme, T_g , et où un taux de transfert de chaleur constant par unité de longueur, q' émane de la ligne source, la température à une distance r de la ligne source infinie et à un instant t est donnée par:

$$T(r,t) = T_g + \frac{q'}{4\pi\lambda_g} \int_{\frac{r^2}{4\alpha_g t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \cong T_g + \frac{q'}{4\pi\lambda_g} \left[\ln\left(\frac{4\alpha_g t}{r^2}\right) - \gamma \right] \quad (2.1)$$

où $\gamma=0.5772$ est la constante d'Euler-Mascheroni. La simplification présentée à droite dans l'Équation 2.1 induit une erreur de 2.5 % pour un nombre de Fourier, $\alpha_g t / r^2 \geq 20$ et de 10 % pour $\alpha_g t / r^2 \geq 5$, selon Gehlin (2002).

En supposant une température à la paroi du puits constante sur sa périphérie, $T_b(r_b, t)$ et introduisant une résistance thermique du puits, R_b entre le fluide et la paroi du puits, on obtient la température moyenne du fluide, $T_{f_{moy}}$ à partir de l'Équation 2.1 :

$$T_{f_{moy}}(r_b, t) = T_g + \frac{q'}{4\pi\lambda_g} \left[\ln\left(\frac{4\alpha_g t}{r_b^2}\right) - 0.5772 \right] + q'R_b \quad (2.2)$$

Les valeurs de λ_g et de R_b sont obtenues en traçant un graphique semi-log de la température moyenne du fluide, $T_{f_{moy}} = (T_{f, in} + T_{f, out})/2$ en fonction du logarithme du temps. Après un certain temps, la courbe adopte un profil linéaire pour une équation de la forme:

$$T_{f_{moy}}(t) = m \cdot \ln(t) + b \quad (2.3)$$

où m est la pente de la droite et b est l'ordonnée à l'origine. La valeur de λ_g est déterminée par les Équations 2.1 et 2.3, selon:

$$\lambda_g = \frac{q'}{4\pi m} \quad (2.4)$$

Avec la valeur de λ_g connue et l'Équation 2.2, on trouve la valeur de R_b :

$$R_b = \frac{1}{q'} (T_{f_{moy}}(t) - T_g) - \frac{1}{4\pi\lambda_g} \left[\ln\left(\frac{4\alpha_g t}{r_b^2}\right) - 0.5772 \right] \quad (2.5)$$

La température non perturbée du sol, T_g est obtenue en faisant circuler le fluide sans injection de chaleur dans le puits et en mesurant la température du fluide à la sortie du puits (l'influence de l'énergie de pompage doit être prise en compte) ou en insérant une sonde à divers niveaux dans le puits lorsque la présence d'eau souterraine le permet.

Suite à l'installation des tubes en U et à l'injection du coulis de remplissage dans un forage vertical, Kavanaugh (2001) cité par ASHRAE (2003) recommande un délai de trois à cinq jours avant de procéder à la mesure de T_g suivi de l'essai de réponse thermique, dans le but de dissiper l'énergie transmise au sol lors des opérations de forage et d'installation du puits géothermique.

La valeur de α_g est estimée à partir des observations sur la composition des unités géologiques rencontrées lors du forage. L'Annexe 8 présente l'effet de la variation de la valeur de la diffusivité thermique du sol sur la température du fluide circulant dans un puits lors d'une simulation.

2.2.2 Effets thermiques de l'écoulement de l'eau souterraine

Les effets thermiques associés aux écoulements d'eau souterraine à travers l'échangeur géothermique sont pauvrement documentés et l'information disponible offre le plus souvent des conclusions qualitatives d'ordre général. Ingersoll (1954) indique que l'influence du mouvement de l'eau souterraine sur le gradient thermique dans le sol entourant une source verticale de chaleur est négligeable lorsque la vitesse de l'écoulement est inférieure à 0.305 cm/hr.

Selon un modèle numérique 3D par différences finies, Lund et Östman (1984) étudient l'effet de l'eau contenue dans le sol sur un système géothermique de stockage thermique couplé à des capteurs solaires. Leurs résultats indiquent que pour un volume de stockage de 216 000 m³ de sable de perméabilité égale à 10⁻¹¹ m² (~ grains moyens) opérant à une température d'environ 20 °C, la fraction solaire, FS (fraction de l'énergie de chauffage consommée par le bâtiment qui est fournie par le système de capteurs solaires et l'échangeur géothermique) est réduite de 12 % par rapport à un cas de perméabilité nulle lorsqu'on applique un gradient hydraulique de 0.3 % dans le sol composant l'échangeur géothermique.

Eskilson (1987) utilise la théorie de la ligne source infinie de chaleur pour étudier l'effet d'un écoulement souterrain dans des conditions homogènes autour d'un seul puits. Les conclusions indiquent que sous des conditions "normales", en référence à l'Équation 2.6, l'influence de l'écoulement souterrain est négligeable sur le comportement thermique de l'ensemble lorsque:

$$\frac{H \cdot \rho_f \cdot c_{p,w} \cdot K \cdot i}{2\lambda_g} < 1 \quad (2.6)$$

où H est la longueur du puits, ρ_f est la masse volumique de l'eau, $c_{p,w}$ est la chaleur spécifique de l'eau à pression constante, K est la conductivité hydraulique du sol et i est le gradient hydraulique dans le sol.

Ce critère est rencontré pour des conditions typiques suivantes : un puits de 100 m de longueur dans un roc ou une argile relativement imperméable de conductivité hydraulique inférieure à $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et de conductivité thermique égale à $2.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$, soumis à un gradient hydraulique inférieur à 1%.

Sutton et al. (2003) présentent une solution au problème de transfert de chaleur dans le sol entourant un puits géothermique en tenant compte de l'écoulement d'eau souterraine. Les auteurs s'appuient notamment sur la solution au problème d'une ligne source en mouvement donnée par Carslaw et Jaeger (1959).

2.3 Capteurs solaires

On utilise généralement le terme capteur solaire plutôt que panneau solaire lorsque le rayonnement solaire est converti en énergie thermique plutôt qu'électrique. La Figure 2.5 montre une représentation d'un tel capteur solaire qui utilise un liquide comme fluide caloporteur. C'est généralement ce genre de capteur qui est utilisé dans les systèmes de stockage saisonnier.

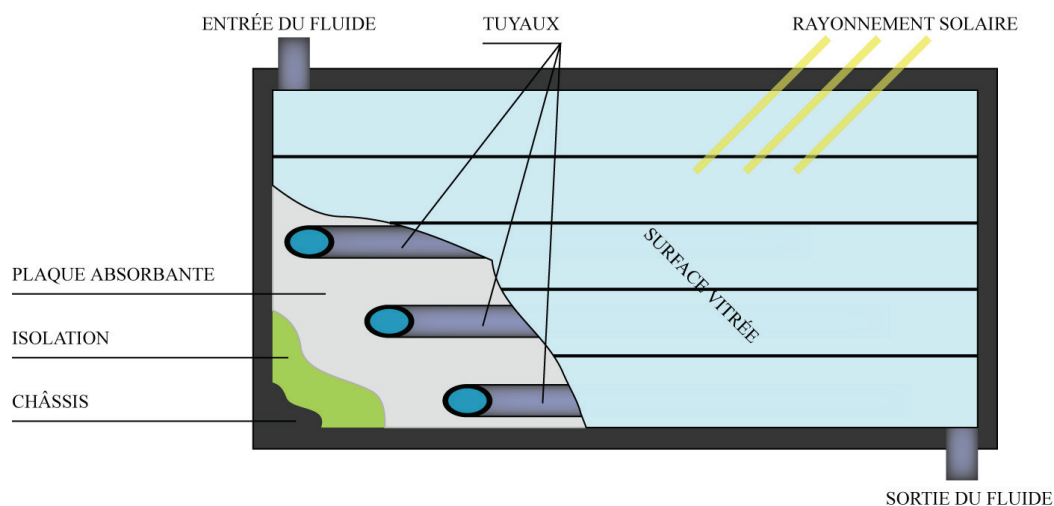


Figure 2.5: Capteur solaire plan vitré utilisé dans les systèmes de stockage saisonnier.

Le fluide circulant à l'intérieur des capteurs solaires peut être le même que celui qui circule dans l'échangeur géothermique ou d'un autre type. Lorsque le fluide qui circule dans les capteurs n'est pas le même que celui de l'échangeur géothermique, on installe un échangeur de chaleur secondaire entre les deux circuits pour permettre le transfert de chaleur entre ceux-ci. Les

capteurs solaires thermiques sont généralement constitués d'une surface vitrée, qui crée un effet de serre, et d'une surface absorbante. Une lame d'air sépare généralement ces deux surfaces. Selon leur température d'opération, soit l'écart entre la température du fluide à l'entrée du capteur, $T_{f,in}$ et la température extérieure, T_{ext} on opte pour des capteurs dont la surface est vitrée ou non. Les capteurs non vitrés sont employés lorsque l'écart de température est faible, soit environ moins de 20 °C. Les capteurs à haut rendement sont sélectionnés pour des températures d'opération élevées, soit lorsque les écarts sont supérieurs à 50 °C. Les capteurs à haut rendement sont formés de tubes sous vide à l'intérieur desquels circule le fluide, diminuant ainsi les pertes thermiques vers l'environnement.

Le rendement d'un capteur solaire exprime la fraction du rayonnement solaire incident qui est transmise au fluide circulant à l'intérieur de celui-ci. Le rendement est régi par une équation de la forme :

$$\eta_{\text{capteur}} = a0 - a1(T_{f,in} - T_{ext})/G - a2(T_{f,in} - T_{ext})^2/G \quad (2.7)$$

où $a0$ (-) est le coefficient d'efficacité optique, soit l'ordonnée à l'origine de la courbe de rendement, $a1$ ($\text{W} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) et $a2$ ($\text{W} \cdot ^\circ\text{C}^{-2} \cdot \text{m}^{-2}$) sont des coefficients de perte thermique, soit la pente et la courbure de la courbe de rendement et G ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) est le rayonnement solaire incident global (direct et diffus) dans le plan du capteur (basé sur la surface projetée maximale du capteur, incluant le châssis). Dans certains cas, le troisième terme de droite de l'Équation 2.7 est négligé, ce qui permet de simplifier la représentation du rendement par une droite et lorsque l'écart $T_{f,in} - T_{ext}$ est négatif, le rendement du capteur est supérieur à $a0$. Le lecteur est invité à consulter le livre de Duffie et Beckman (2006) pour plus de détails sur l'Equation 2.7

La Figure 2.5 présente des courbes de rendement basées sur les méthodes de ASHRAE (*Standard 93-1986* et *Standard 96-1980*) pour trois types de capteurs solaires (SRCC, 2009) soumis à un rayonnement solaire incident de $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Il est à noter que dans tous les cas, le rendement du capteur va en décroissant suivant l'augmentation de la température d'opération.

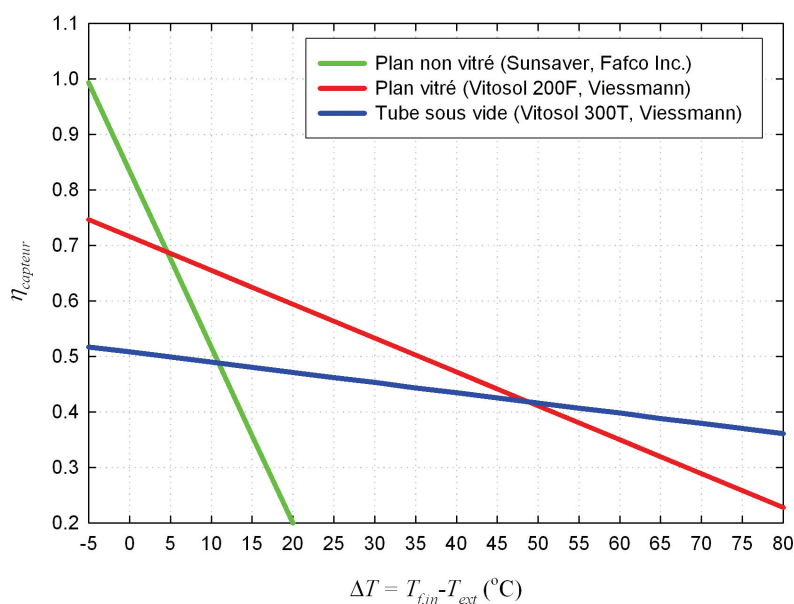


Figure 2.6: Courbes de rendement de trois capteurs solaires thermiques soumis à un rayonnement incident global de $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

À titre informatif, le rayonnement incident global (direct et diffus) moyen annuel (jour et nuit) sur une surface horizontale, pour les régions de Montréal et de Toronto, est d'environ $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ avec des pointes horaires autour de $1\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Atmospheric Sciences Data Center, 2009) en été. Le rayonnement solaire incident reçu par un capteur solaire varie selon son orientation et son inclinaison. Si les conditions le permettent, un capteur solaire situé dans l'hémisphère nord doit être orienté vers le sud avec une inclinaison correspondante à la latitude de l'endroit (environ 45° à Montréal) pour bénéficier du maximum de rayonnement sur une base annuelle.

2.4 Pompes à chaleur

Une pompe à chaleur (PAC) est utilisée dans le cas où la température du fluide sortant de l'échangeur géothermique n'en permet pas une utilisation directe, constante et efficace pour le chauffage ou la climatisation du bâtiment. Typiquement, la température du fluide circulant dans le circuit de distribution du bâtiment pour le chauffage des espaces ou la climatisation est de l'ordre de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivement. La fonction première de la PAC consiste donc à effectuer un échange d'énergie entre le fluide en provenance de l'échangeur géothermique et le fluide frigorigène circulant dans la PAC. De manière relative, la PAC peut chauffer à partir d'un fluide froid et refroidir à partir d'un fluide chaud. Pour permettre cet échange, le fluide frigorigène est soumis à un cycle thermodynamique d'évaporation-compression-condensation-détente, tel que présenté aux Figures 2.7 et 2.8. En mode chauffage, le circuit de distribution du bâtiment interagit thermiquement avec la section du circuit interne de la PAC où a lieu la condensation du fluide frigorigène, tandis que le circuit de l'échangeur géothermique interagit avec l'évaporateur où a lieu l'évaporation du fluide frigorigène. En mode climatisation, la situation inverse se produit.

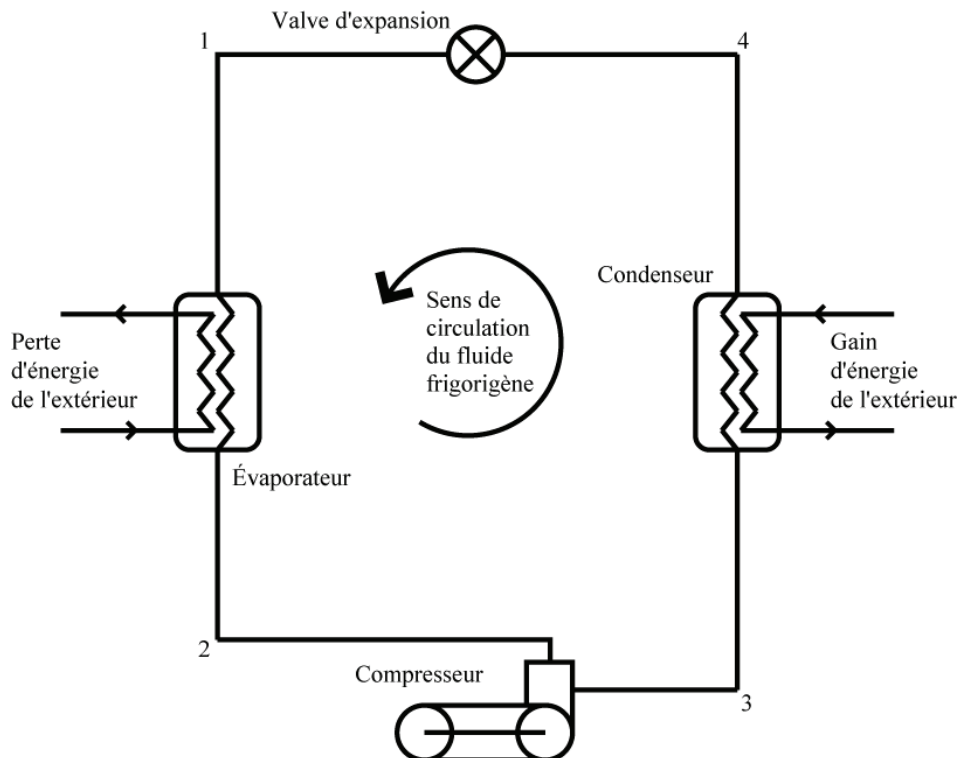


Figure 2.7: Circuit interne d'une pompe à chaleur.

La Figure 2.8 présente un cycle thermodynamique idéal par compression d'un fluide frigorigène. Le fluide frigorigène se vaporise de 1 à 2 à basse pression et à basse température en recevant l'énergie du fluide d'un circuit extérieur qui est alors refroidi. Le fluide frigorigène, sous forme vapeur en 2, est ensuite comprimé mécaniquement de 2 à 3, ce qui a pour effet d'augmenter sa pression et sa température. Le fluide frigorigène à haute pression et à haute température en 3, se condense de 3 à 4 en cédant de l'énergie au fluide d'un autre circuit extérieur qui est alors réchauffé. Le fluide frigorigène termine le cycle par une détente dans la valve d'expansion, de 4 à 1, se traduisant par une vaporisation partielle et une baisse de température et de pression.

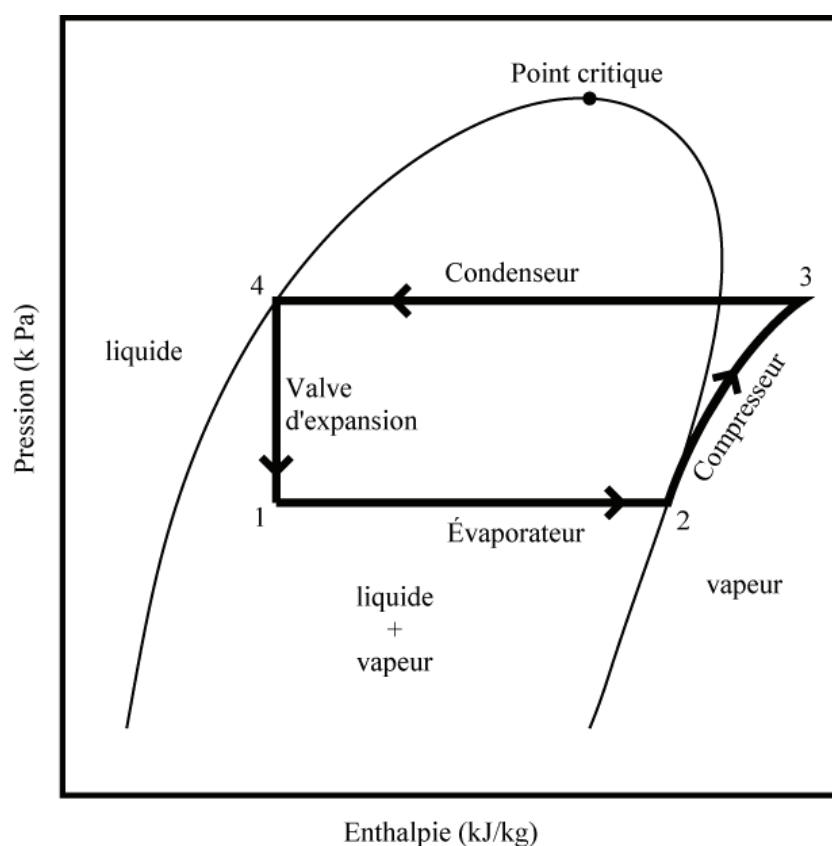


Figure 2.8: Cycle thermodynamique idéal par compression d'un fluide frigorigène.

Le principal élément de consommation d'énergie d'une PAC est son compresseur. L'énergie nécessaire au fonctionnement du compresseur est transférée au fluide frigorigène lors de la compression. Le coefficient de performance (COP) est la mesure du rapport entre l'énergie transmise ou extraite du bâtiment et l'énergie nécessaire au fonctionnement de la PAC, soit l'énergie de compression (voir la Figure 2.8, de 2 à 3). Pour une PAC donnée, le COP est fonction de l'écart entre les températures d'évaporation et de condensation; plus cet écart est grand et plus le COP sera faible. La valeur du COP en chauffage et en climatisation est généralement comprise entre trois et six pour les PAC communément utilisées dans le domaine de la géothermie.

Les PAC sont classées, entre autres, par le type de fluide (eau ou air) qui circule dans chacun des deux circuits interagissant avec celle-ci (côté de l'évaporateur - côté du condensateur). Ainsi, on retrouve des PAC de type: eau-eau, eau-air, air-air et air-eau. Dans le cas des systèmes d'échangeur géothermique tels que décrits dans ce mémoire, les PAC utilisées sont de type eau-eau ou eau-air puisque de l'eau (solution eau-antigel) circule dans les tubes en U de l'échangeur géothermique.

Typiquement, une PAC du commerce fonctionne selon une gamme de températures du fluide à son entrée, soit en provenance de l'échangeur géothermique, pouvant atteindre jusqu'à -6°C en mode de chauffage du bâtiment et jusqu'à 45°C en mode de climatisation du bâtiment.

2.5 Chauffage auxiliaire

En raison des propriétés thermiques du sol et des caractéristiques des pompes à chaleur géothermiques conventionnelles, les échangeurs géothermiques ne permettent généralement pas de répondre aux besoins en eau chaude d'un bâtiment nécessitant d'élever la température de l'eau à environ 60 °C. Le chauffage auxiliaire, une chaudière au gaz naturel par exemple, permet d'assurer les besoins en eau chaude et sert également de source d'énergie d'appoint pour le chauffage des espaces. Le chauffage auxiliaire permet aussi de diminuer l'effet des pointes énergétiques sur le dimensionnement de l'échangeur géothermique en reprenant une partie de la charge de chauffage du bâtiment.

2.6 Réservoirs de stockage de courte durée

Dans les systèmes d'échangeur géothermique destinés au stockage saisonnier, le réservoir de courte durée est un réservoir de fluide servant à emmagasiner de l'énergie. Ce réservoir agit comme élément tampon entre les capteurs solaires, l'échangeur géothermique et le bâtiment dans le but de maximiser le taux de transfert de chaleur entre ceux-ci. La présence des réservoirs de courte durée affecte directement le dimensionnement du système d'échangeur géothermique visant le stockage saisonnier en aplanissant le profil des échanges d'énergie entre les éléments du système dans le temps par l'écrtage des pointes. Généralement, tel qu'indiqué pour les exemples de projets au Tableau 1.1, lorsqu'un système d'échangeur géothermique de stockage saisonnier comprend des réservoirs de courte durée, il n'utilise pas de pompes à chaleur et vice versa.

CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU MODÈLE DST

3.1 Introduction

Ce chapitre présente le modèle DST (Type557) et le modèle DST modifié (Type257). Le premier de ces modèles est le modèle standard fourni avec la librairie TESS (TESS, 2004, version 2.03) de TRNSYS (Klein et al., 2004). Il est considéré comme un modèle de référence et est souvent utilisé pour valider d'autres modèles (Shonder et al., 2000). Cependant, les méthodes de calcul du modèle DST sont très peu documentées dans la littérature scientifique et un des objectifs de ce chapitre est de pallier à cette lacune. Le Type257 présente les modifications apportées au Type557 pour le rendre apte à simuler des puits à quatre tuyaux (deux tubes en U) alimentés par deux réseaux indépendants.

Avant d'aborder la description détaillée de ces deux modèles, il est utile de décrire brièvement l'environnement de simulation TRNSYS pour lequel les deux types ont été bâtis.

3.2 Notions de base sur TRNSYS

TRNSYS (TRaNsient SYstems Simulation program) est un logiciel de simulation destiné aux ingénieurs et aux chercheurs scientifiques. La version 16.01.0002 de TRNSYS a été utilisée dans ce mémoire. TRNSYS permet de simuler le comportement transitoire d'un système composé de divers éléments (capteurs solaires, pompes, tuyauterie, ventilation, refroidisseur, échangeur géothermique, réservoir, bâtiment, pompes à chaleur, etc.) interagissant entre eux. Dans TRNSYS, les éléments portent l'appellation "Type" suivie d'un numéro propre à chaque élément. La bibliothèque de TRNSYS inclut divers modèles d'éléments parmi lesquels l'utilisateur fait son choix pour bâtir un projet. L'utilisateur peut également créer de nouveaux modèles d'éléments et les joindre à la bibliothèque de TRNSYS. La Figure 3.1 présente le *studio* TRNSYS où les différents éléments d'un système sont reliés. L'échange d'information (les sorties d'un modèle deviennent les entrées d'un autre) entre les éléments se fait à chaque pas de temps TRNSYS, dt_{TRNSYS} spécifié par l'utilisateur, mais un élément peut avoir ses propres pas de temps internes lui permettant de raffiner la solution du problème qu'il modélise. Une des fonctions principales de TRNSYS est d'assurer la convergence de la valeur de chaque donnée d'entrée de chaque élément, lors de chaque pas de temps dt_{TRNSYS} .

La Figure 3.1 montre un exemple de projet dans TRNSYS avec trois éléments (capteurs solaires, échangeur géothermique, fichier météo) et une sortie graphique.

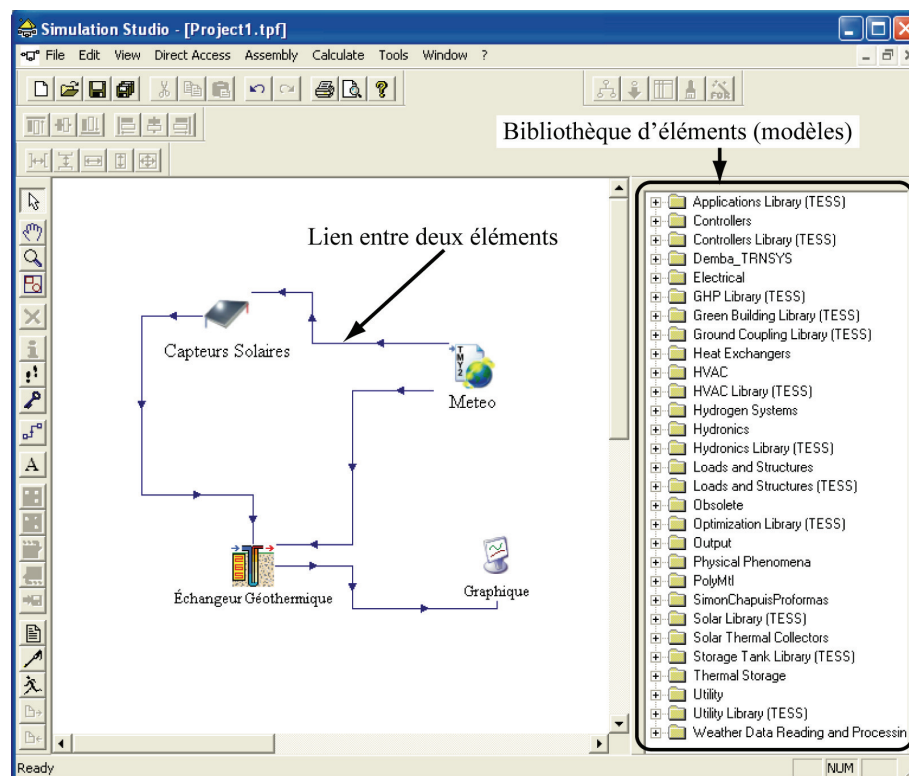


Figure 3.1: Fenêtre du studio TRNSYS version 16.01.0002.

3.2.1 Le *proforma* sous TRNSYS

Le *proforma* est l'appellation de TRNSYS pour décrire l'interface d'un modèle d'élément (Type quelconque) où l'utilisateur spécifie les valeurs des différentes variables nécessaires à son fonctionnement.

3.3 Modèle DST

Le modèle DST (*Duct ground heat STorage model*) est un modèle numérique 2D axisymétrique d'échangeur géothermique vertical en boucle fermée qui a été initialement développé par Claesson et al. (1981) au département de mathématique et physique de l'Université de Lund (Suède).

Depuis sa création, d'autres chercheurs ont participé à l'évolution du modèle DST et à son implantation dans l'environnement TRNSYS dont Mazzarella (1989) et Pahud (1996). Le modèle DST a notamment été choisi en 1981 pour la simulation du stockage solaire saisonnier par les participants du programme sur l'énergie solaire (*Solar Heating and Cooling Program*) de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), Tâche VII (*Central Solar Heating Plant with Seasonal Storage*).

Le Type557 de la librairie TESS (2004, version 2.03) de TRNSYS contient 4 modes d'utilisation différents du modèle DST selon le type de tuyau utilisé dans les puits, en U ou concentrique, et la valeur de la résistance thermique entre le fluide circulant dans un puits et la paroi du puits qui peut être fixée par l'utilisateur ou calculée par le modèle.

La description du modèle DST présentée dans ce mémoire s'applique au Type557 avec l'utilisation de tubes en U et le calcul de la résistance thermique du puits par le modèle. Un exemple détaillant les étapes de modélisation (présentées dans ce chapitre) d'un échangeur géothermique formé de deux puits est présenté à l'Annexe 3.

Le modèle DST considère uniquement le mode de transfert de chaleur par conduction dans le sol. La solution au problème de transfert de chaleur dans le sol est obtenue par le principe de superposition (additivité des solutions partielles), permis par la forme linéaire de l'équation de transfert de chaleur par conduction, présentée ici en coordonnées cylindriques sous sa forme tridimensionnelle:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha_g} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Dans le jargon du modèle DST, les trois solutions partielles au problème de conduction dans le sol sont dites : *Local*, *Global* et *Steady flux*.

La solution au problème *Local* est obtenue par la construction de plusieurs maillages *Local* représentant chacun une section verticale d'un cylindre de sol attribuable à chaque puits. La solution au problème *Global* est obtenue par la construction d'un maillage *Global* représentant l'ensemble du volume de sol attribué à l'échangeur géothermique ainsi que le sol environnant. Le problème *Steady flux* est résolu dans le maillage *Global* et son effet est de redistribuer la

température entre les mailles *Global*. Un maillage dit *Subregion* assure le lien entre les maillages *Local* et le maillage *Global*.

La source d'énergie du problème *Local* provient du fluide circulant dans les tubes en U. L'évolution de la température du fluide à l'intérieur de l'échangeur géothermique, soit durant son passage dans les tubes en U, est basée sur une équation analytique de forme classique posée sur des sections successives de tuyaux dans le problème *Local*. La source d'énergie du problème *Global* provient du problème *Local* et le problème *Steady Flux* n'a pas de source d'énergie.

3.3.1 Géométrie de l'échangeur géothermique

Le volume de stockage et le nombre de puits sont spécifiés par l'utilisateur. L'utilisateur ne peut spécifier la position spatiale exacte des puits. Les puits sont posés comme étant répartis de manière uniforme dans le volume de stockage par le modèle DST. Le volume de stockage est le volume de sol attribué à l'échangeur géothermique (BTES). Dans le modèle DST, le volume de stockage est de forme cylindrique, ce qui implique que les champs de puits construits selon d'autres formes (champs rectangulaires par exemple) ne peuvent pas être modélisés correctement par le modèle DST. La relation reliant le volume de stockage de l'échangeur géothermique, V_{BTES} , son rayon, r_{BTES} , le nombre de puits total, NBH_{tot} la hauteur des puits, H et l'espacement entre les puits, B tous fixés par l'utilisateur (B et V_{BTES} sont dépendants l'un de l'autre pour l'utilisateur), est donnée par :

$$V_{BTES} = \pi \cdot r_{BTES}^2 \cdot H = \pi \cdot r_1^2 \cdot H \cdot NBH_{tot} \quad \text{où } r_1 = 0.525 \cdot B \quad (3.2)$$

Le rayon r_1 est une valeur calculée par le modèle DST qui délimite le rayon du volume de sol de forme cylindrique attribuable à chaque puits. C'est à l'intérieur de ce rayon qu'est calculée la solution au problème *Local*.

La profondeur de l'échangeur géothermique par rapport à la surface du sol est la même que la profondeur des têtes de puits spécifiée par l'utilisateur. Le sol composant l'échangeur géothermique a des propriétés thermiques uniformes tandis que le sol entourant l'échangeur géothermique peut être constitué de couches de sols aux propriétés thermiques distinctes, selon les spécifications de l'utilisateur, tel que présenté à la Figure 3.2. Les explications contenues dans ce chapitre concernent le cas où le sol composant l'échangeur géothermique et le sol environnant partagent les mêmes propriétés thermiques.

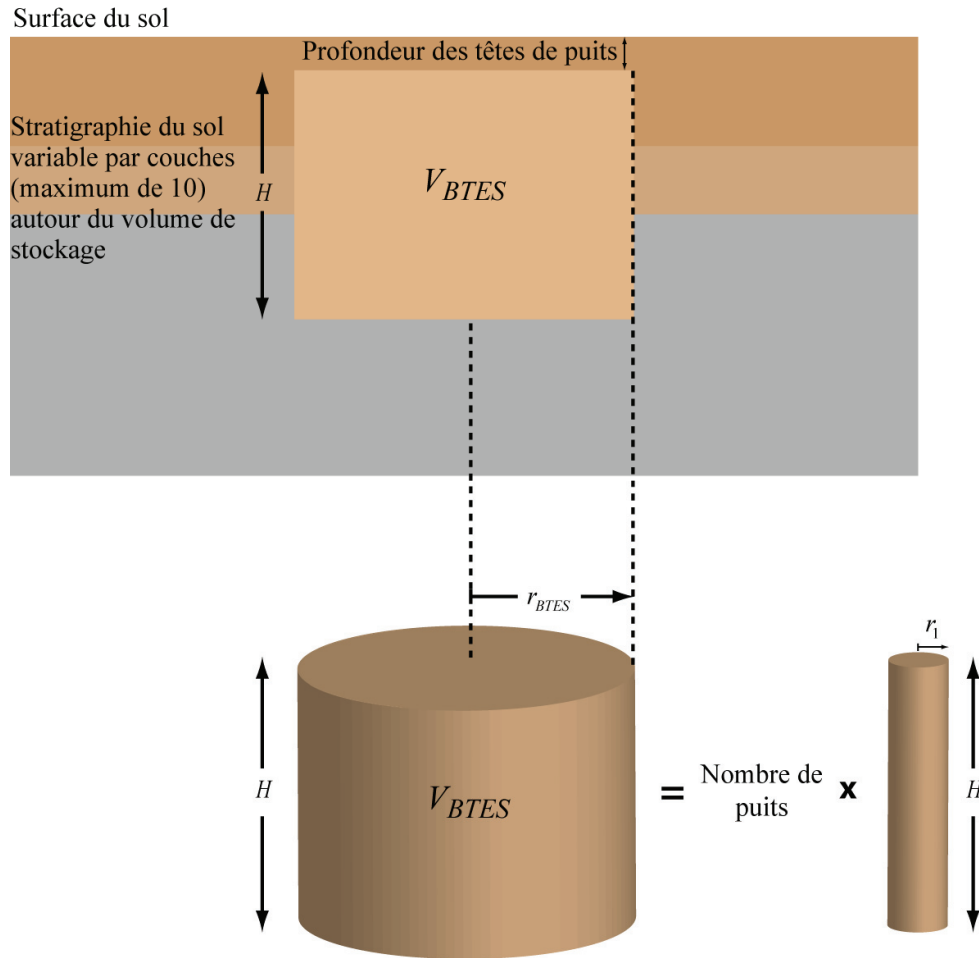


Figure 3.2: Localisation de l'échangeur géothermique dans le sol et paramètres géométriques associés au volume de stockage.

Lorsque l'utilisateur spécifie l'espacement entre les puits, la valeur du volume de stockage s'ajuste automatiquement et vice versa. Le fait de spécifier un espacement entre les puits n'implique pas que leur position puisse être déterminée dans un système de coordonnées selon le modèle DST, il s'agit d'une approximation hypothétique de la disposition des puits les uns par rapport aux autres. Les puits sont répartis de manière uniforme dans le volume de stockage lors des calculs de transfert de chaleur, mais il n'y a pas de position exacte des puits dans le volume de stockage. Lorsque l'utilisateur spécifie l'espacement entre les puits, le modèle DST calcule le volume de stockage en se basant sur une relation tirée d'une géométrie où les puits sont distribués selon un arrangement hexagonal (Hellström, 1989), tel que présenté à la Figure 3.3, d'où la relation

$r_1 = 0.525 \cdot B$ présenté à l'Équation 3.2. Dans cette relation, r_1 est le rayon d'un cercle dont la surface égale celle d'un hexagone, $A_{hexagone}$ dont le rayon du cercle inscrit, $r_{inscrit}$ vaut $B/2$:

$$A_{hexagone} = 2\sqrt{3}r_{inscrit}^2 = \frac{\sqrt{3}}{2}B^2 = \pi \cdot r_1^2 \quad \text{où } r_{inscrit} = B/2 \quad (3.3)$$

L'idée qu'une répartition uniforme des puits dans un volume cylindrique puisse être comparée à un arrangement hexagonal des puits est plus apparente lorsque le nombre de puits permet également un arrangement hexagonal global, donc pour un nombre de puits égal à $6n+1$, avec n impair, tel qu'illustré à la Figure 3.3 pour $n = 3$. La forme générale de champ de puits à la Figure 3.3 est celle pouvant être le mieux être représentée par le modèle DST. En résumé, l'espacement entre les puits spécifié par l'utilisateur ne sert pas à attribuer une position exacte à chaque puits par rapport aux autres, mais à déterminer le volume de stockage cylindrique et le rayon r_1 dans le modèle DST.

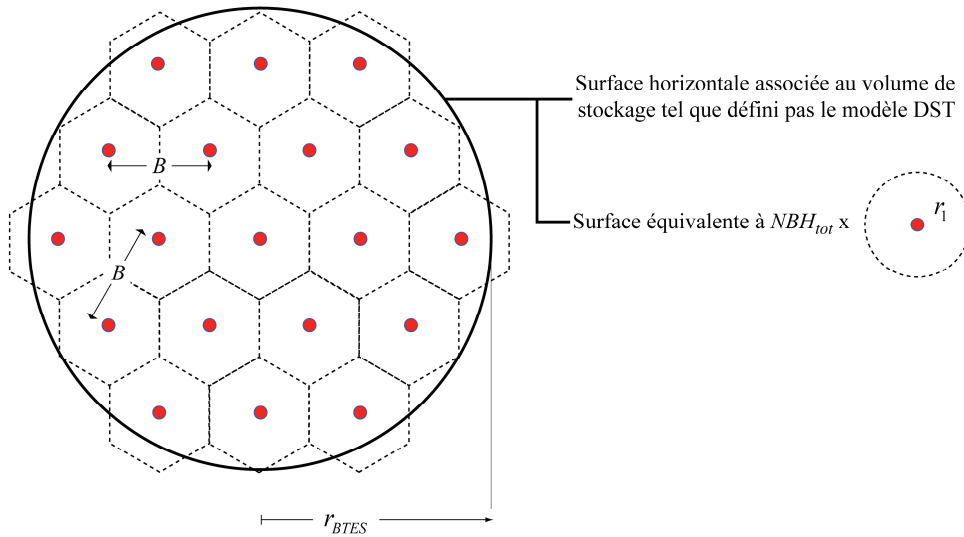


Figure 3.3: Disposition de 19 puits ($6n+1$ avec $n = 3$) selon un arrangement hexagonal entre eux et hexagonal au global.

Le modèle DST ne permet qu'une seule alimentation en fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique à partir de laquelle tous les puits sont alimentés, soit en série ou en parallèle. La température et le débit d'entrée du fluide dans l'échangeur géothermique peuvent être constants ou variables selon les spécifications de l'utilisateur. Le raccordement des puits en série ou en

parallèle est fixé par l'utilisateur par l'entremise d'un paramètre identifiant le nombre de puits en série par branches parallèles. Si la valeur du nombre de puits en série par branches parallèles est posée à un, les puits sont alors tous alimentés en parallèle. Le nombre de puits en série par branches parallèles est une valeur entière unique. Par exemple, pour 11 puits, il n'est pas possible de spécifier une série de 5 puits et une autre de 6 puits. Bien qu'il soit possible de fixer un nombre de puits en série par branches parallèles qui ne soit pas un facteur du nombre total de puits, il n'est pas réaliste de le faire même si cela ne cause aucune contrainte de calcul pour le modèle DST, comme il sera présenté dans la prochaine section.

3.3.2 Maillage *Subregion*

Le maillage *Subregion*, où chaque maille est appelée une *Subregion*, est le premier des trois maillages (*Subregion*, *Local* et *Global*) à être construit durant la phase d'initialisation d'une simulation. Les *Subregion* couvrent uniquement le volume de sol associé au volume de stockage de l'échangeur géothermique par un maillage 2D (r,z) axisymétrique par rapport à l'axe central du volume de stockage. Le maillage *Subregion* s'étend verticalement à partir de la profondeur des têtes de puits (fixée par l'utilisateur) à une profondeur correspondant à la longueur des puits (voir la Figure 3.2). Le maillage *Subregion* s'étend radialement du centre du volume de stockage à son rayon, tel que défini dans l'Équation 3.2. Le nombre de *Subregions* (*NLOC*) est égal au nombre de régions radiales multiplié par le nombre de régions verticales, tout deux spécifiés par l'utilisateur.

La hauteur des régions verticales est définie par un algorithme imposant des mailles plus fines sur le dessus et à la base du BTES, là où les gradients thermiques sont les plus élevés. La largeur des régions radiales, $r_{RR,ext} - r_{RR,int}$ est déterminée de manière à ce que la surface qu'elle modélise $\pi(r_{RR,ext}^2 - r_{RR,int}^2)$ soit proportionnelle au nombre de puits que le modèle DST leur a attribué. Le modèle DST distribue les puits par région radiale selon :

- le modèle DST distribue les puits, un à la suite de l'autre, aux régions radiales en partant du centre du volume de stockage vers sa périphérie et en recommençant (rondes de distribution), jusqu'à atteindre la valeur du nombre de puits en série par branche parallèle fixé par l'utilisateur ;
et

- le nombre de puits ainsi distribué par région radiale divisé par le nombre de puits en série par branche parallèle correspond à la fraction du nombre total de puits qui sera finalement attribué à la région radiale.

Par exemple, si l'utilisateur spécifie un total de 15 puits avec 5 puits en série par branche parallèle et 3 régions radiales, le modèle assignera, en partant du centre du volume de stockage :

Région radiale no.	1 ^{ère} ronde de distribution	2 ^{ème} ronde de distribution	Total de puits
1 :	1	1	$\Rightarrow \frac{2}{5} \times 15 = 6$ puits
2 :	1	1	$\Rightarrow \frac{2}{5} \times 15 = 6$ puits
3 :	1	-	$\Rightarrow \frac{1}{5} \times 15 = 3$ puits

Selon cet exemple, la surface de la région radiale no.3, $\pi(r_{RR_3,ext}^2 - r_{RR_3,int}^2)$, couvre la moitié de la surface couverte par les deux autres régions radiales. Les *Subregion* sont identifiés de 1 à *NLOC* suivant l'ordre de numérotation présenté à la Figure 3.4.

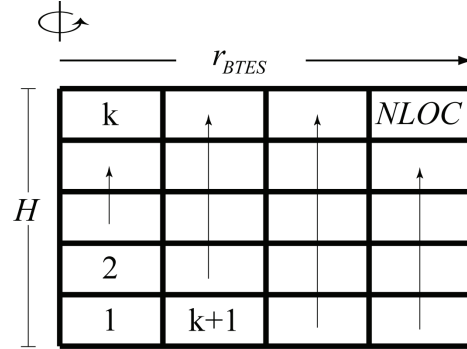


Figure 3.4: Représentation schématique de l'ordre de numérotation des *Subregion* couvrant le volume de stockage.

À chaque *Subregion* k (avec k allant de 1 à *NLOC*) est attribuée une longueur de puits, L_{Sub_k} sur laquelle circule le fluide dans le maillage *Local* dont la description est donnée plus loin. L_{Sub_k} est égale à la hauteur de la *Subregion* k multiplié par le nombre de puits attribué à la région radiale dont elle fait partie.

L_{Sub_k} est donc la longueur d'un puits équivalent à la fraction de la longueur totale de puits dans le volume de stockage correspondant au rapport entre le volume de sol représenté par la *Subregion* k et le volume de stockage. Le fluide circule de la *Subregion* 1 à *NLOC* si l'utilisateur spécifie un écoulement du centre vers la périphérie du volume de stockage (toujours de bas en haut, à partir du centre et en progressant vers la périphérie du volume de stockage) ou de la *Subregion* *NLOC* à 1 pour un écoulement de la périphérie vers le centre (toujours de haut en bas, à partir de la périphérie et en progressant vers le centre du volume de stockage). Rappelons que le maillage *Subregion* sert uniquement à faire le lien entre les maillages *Local* et le maillage *Global* où ont lieu les échanges de chaleur, tels que décrits dans les sections suivantes.

Il est important de noter que le nombre de régions radiales ne peut excéder le nombre de puits en série par branche parallèle. Ainsi, lorsque tous les puits sont alimentés en parallèle, c'est-à-dire que le nombre de puits en série par branches parallèles est posé égal à 1, il ne peut y avoir qu'une seule région radiale et la température du fluide le long d'un puits est la même pour tous les puits.

3.3.3 Maillage *Global*

Après sa construction, le maillage *Subregion* est utilisé comme base de référence à la construction du maillage *Global*. Le maillage *Global* est utilisé pour modéliser le transfert de chaleur dans l'ensemble du sol composant le volume de stockage et entre le volume de stockage et son environnement. Le maillage *Global* comprend une version raffinée du maillage *Subregion* pour la portion couvrant le volume de stockage et une extension radiale et verticale dans le sol environnant. Les limites des mailles *Global* couvrant le volume de stockage sont posées de manière à ne pas entrecouper les limites des *Subregion*, autrement, chaque *Subregion* contient un nombre entier de mailles *Global*. De cette façon, à chaque *Subregion* sont associées une ou plusieurs mailles *Global*. Par exemple, à la Figure 3.5, la *Subregion* 8 contient deux mailles *Global* tandis que la *Subregion* 13 en contient quatre.

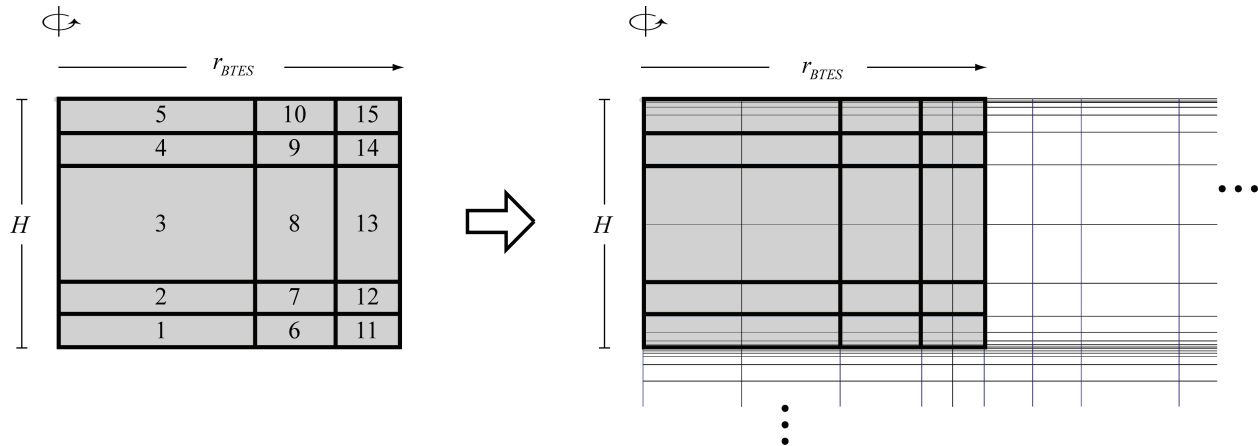


Figure 3.5: Un maillage *Subregion* composé de trois régions radiales et cinq régions verticales pour un total de quinze *Subregion* (à gauche). Le maillage *Global* construit à partir du maillage *Subregion* (à droite).

L'extension radiale et verticale à partir des limites du volume de stockage dans le maillage *Global* est générée par un algorithme prenant en compte les propriétés thermiques du sol et le nombre d'années de simulation (fixées par l'utilisateur), selon :

- la dimension, selon l'axe r ou z , des deux premières mailles à l'extérieur du BTES est égale à $2\sqrt{\alpha_g t}$, où t est fixé à 72 heures ;
- la dimension, selon l'axe r ou z , des mailles subséquentes croît successivement d'un facteur 2 jusqu'à ce que le maillage atteigne une distance supérieure à $2\sqrt{\alpha_g t}$ par rapport au rayon ou à la base du volume de stockage, où t est le nombre d'années à simuler spécifiées par l'utilisateur ; et
- la dernière maille se termine alors 100 m plus loin (valeur fixe).

Les mailles *Global* couvrant un volume de sol sont numérotées radialement de 2 à $IMAX$ à partir de l'axe central du volume de stockage et verticalement de 2 à $JMAX$ à partir de la surface du sol.

3.3.4 Maillages *Local*

Pour chaque *Subregion* k est associé un maillage *Local* k . Il y a donc autant de maillage *Local* qu'il y a de *Subregion* (rappel: k allant de 1 à $NLOC$). Un maillage *Local* k modélise les effets

thermiques dans le sol entourant un puits et causés par la circulation du fluide dans le puits de longueur L_{Sub_k} . Le volume de sol modélisé par un maillage *Local* k est posé de forme cylindrique et le puits de longueur L_{Sub_k} est situé en son centre. Les maillages *Local* sont des maillages 1D (r) axisymétriques par rapport à l'axe d'un puits. Il n'y a pas de conduction thermique axiale à l'intérieur des maillages *Local*. Tous les maillages *Local* ont une géométrie identique (nombre de mailles et longueur radiale des mailles), s'étendant du rayon d'un puits, r_0 au rayon r_1 . Les mailles *Local* sont numérotées de 2 à $IMAXR$ entre r_0 et r_1 selon un algorithme créant des mailles représentant un volume de sol croissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne du puits (voir la Figure 3.6).

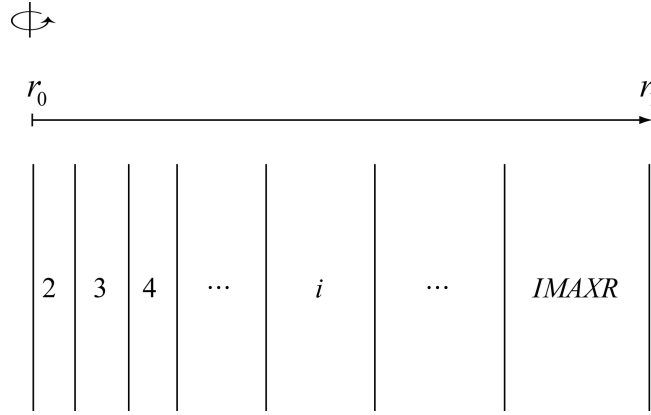


Figure 3.6: Représentation schématique de la géométrie d'un maillage *Local*.

Bien que les *Subregion* ne partagent pas la même géométrie que le maillage *Local* qui leur est associé, le volume de sol que représente une *Subregion* k est le même que celui du maillage *Local* k qui lui est associé, en passant par la longueur de puits, L_{Sub_k} . Pour une *Subregion* k et le maillage *Local* k associé, on a:

$$\pi \cdot r_1^2 \cdot L_{Sub_k} = \pi (r_{Sub_k,ext}^2 - r_{Sub_k,int}^2) (z_{Sub_k,ext} - z_{Sub_k,int}) \quad (3.4)$$

où $r_{Sub_k,ext}$ et $r_{Sub_k,int}$ sont respectivement le rayon externe et interne de la *Subregion* k et $z_{Sub_k,ext} - z_{Sub_k,int}$ est l'épaisseur verticale de la *Subregion* k , tels que présenté à la Figure 3.7 pour la *Subregion* 8, par exemple.

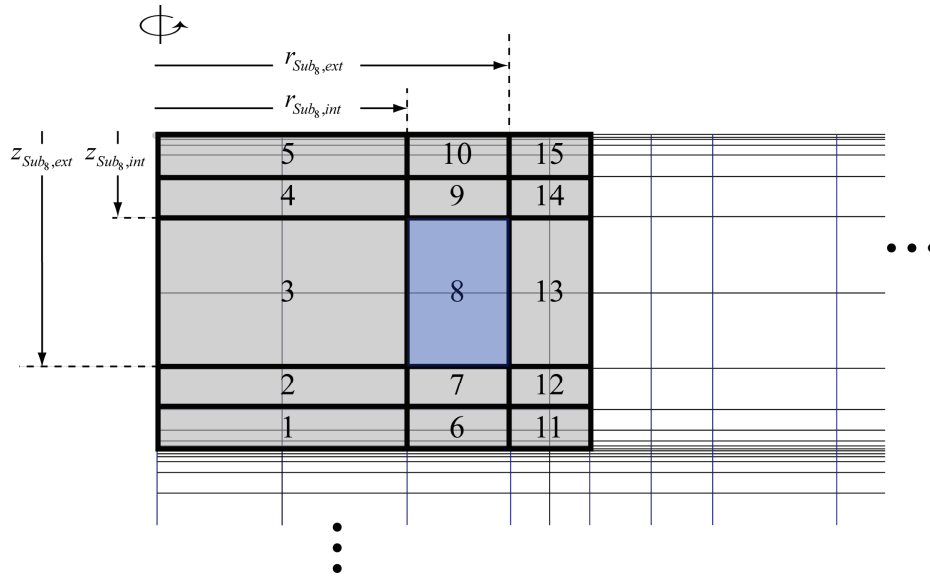


Figure 3.7: Paramètres géométriques associés à la *Subregion* 8.

3.3.5 Conditions frontières et initiales

Les conditions frontières des maillages *Local* sont :

- Taux de transfert de chaleur par unité de longueur connu en r_0 ; et
- Taux de transfert de chaleur nul en r_1 .

Les conditions frontières du maillage *Global* sont :

- température de surface du sol selon la spécification de l'utilisateur ;
- Taux de transfert de chaleur nul selon r à l'entrée des premières mailles, soit à l'axe central du volume de stockage ; et
- Taux de transfert de chaleur nul selon r et z à la sortie des dernières mailles selon r et z .

La condition initiale des mailles *Local* est une température des mailles égale à 0 °C. La condition initiale des mailles *Global* est la température initiale de surface spécifiée par l'utilisateur à moins qu'il n'ait spécifié une période de préchauffage ou un gradient géothermique non nul dans le sol.

Il est à noter que la position des mailles Global pour $i = 1$ est utilisée pour imposer la condition frontière de température de surface du sol, tandis la position des mailles Global pour $j = 1$ est utilisée pour imposer la condition frontière de taux de transfert de chaleur nul selon r à l'axe central du volume de stockage. Aucun volume de sol n'est associé à ces mailles.

3.3.6 Détermination des pas de temps

Bien que l'utilisateur doive spécifier un pas de temps dans le studio TRNSYS, dt_{TRNSYS} , le modèle DST utilise ses propres pas de temps, un pour les maillages *Local* et un autre pour le maillage *Global*, lors des calculs de transfert de chaleur. Le pas de temps de calcul spécifié dans le *studio* TRNSYS devient alors un pas de temps pour l'entrée des variables au modèle DST (température du fluide à l'entrée et débit du fluide à l'entrée) et la sortie des résultats dans le *studio* TRNSYS, c'est-à-dire vers un autre élément, par exemple, un groupe de capteurs solaire, un bâtiment ou simplement une sortie de données graphiques.

3.3.6.1 Problème *Local*

Le calcul du transfert de chaleur dans les maillages *Local* est effectué à partir du début de la simulation et à chaque pas de temps court dtr . Plus précisément, le calcul est effectué n fois durant le pas de temps spécifié dans le *studio* TRNSYS où n est l'entier supérieur de la valeur du pas de temps du *studio* TRNSYS divisé par dtr . Pour chaque pas de temps dtr à l'intérieur d'un pas de temps dt_{TRNSYS} , la température et le débit du fluide à l'entrée du volume de stockage sont constants. La valeur du pas de temps dtr est basée sur les propriétés thermiques du sol, la résistance thermique du puits sans interaction thermique entre les tuyaux, R_b^* (défini plus loin) et les dimensions des maillages *Local*, tel que :

$$dtr = dt_{TRNSYS} \cdot \left[\text{partie entière de} \left(\frac{dt_{TRNSYS}}{dtr_{MAX}} \right) + 1 \right]^{-1} \quad (3.5)$$

$$\text{où } dtr_{MAX} = \left[\max_{i=2}^{IMAXR} \left[\left(G_{Loc_k,i} + G_{Loc_k,i+1} \right) \cdot \left(\rho c_p \pi \left(r_{Loc_k,i+1}^2 - r_{Loc_k,i}^2 \right) \right)^{-1} \right] \right]^{-1}$$

$$\text{avec } G_{Loc_k,2} = \frac{2\pi\lambda_g}{\ln\left(\frac{\bar{r}_{Loc_k,2}}{r_{Loc_k,2}}\right) + R_b^* \cdot 2\pi\lambda_g} \text{ et } G_{Loc_k,i} = \frac{2\pi\lambda_g}{\ln\left(\frac{\bar{r}_{Loc_k,i}}{\bar{r}_{Loc_k,i-1}}\right)} \text{ pour } i \geq 3$$

où $r_{Loc_k,i}$ est le rayon interne et $\bar{r}_{Loc_k,i}$ est le rayon moyen de la maille *Local* de position $r = i$ et pour un maillage *Local* k quelconque (voir Figure 3.6) puisque tous les maillages *Local* ont les mêmes dimensions de mailles.

3.3.6.2 Problème *Global*

Le calcul du transfert de chaleur dans le maillage *Global* débute après un temps correspondant à un nombre de Fourier (où $Fo = \alpha_g t / r_1^2$) égal à 0.2 ($t_{Fo=0.2}$). Après $t_{Fo=0.2}$, les calculs de transfert de chaleur sont effectués à chaque pas de temps long dt . Le pas de temps long dt est une fraction du temps $t_{Fo=0.2}$ calculée à partir des dimensions des mailles *Global* et de leurs propriétés thermiques à la manière de l'Équation 3.5. Ainsi, après le temps $t_{Fo=0.2}$, le modèle DST ne tient plus seulement compte d'un transfert de chaleur radial dans le sol autour des puits, soit dans les maillages *Local*, mais également vertical puisque le maillage *Global* est un maillage 2D (r,z).

Hellström (1991) donne une explication sur le temps correspondant à $Fo = 0.2$ basé sur l'analyse à une dimension (selon l'axe radial) de l'évolution de la température par conduction dans le sol autour d'un puits pour lequel les conditions frontières sont : flux de chaleur constant au rayon du puits, r_0 et flux de chaleur nul à une distance radiale r_1 du puits. Pour les temps inférieurs à $t_{Fo=0.2}$, la forme du profil de température entre r_0 et r_1 est variable, mais devient constante après ce temps et la température de chaque point du sol entre r_0 et r_1 évolue alors linéairement dans le temps.

3.3.7 Résistance thermique d'un puits

Le modèle DST permet de spécifier jusqu'à dix tubes en U par puits et les tuyaux sont considérés être répartis uniformément autour du centre du puits. Cependant, peu importe le nombre de tubes en U par puits, le modèle DST modélise la circulation du fluide dans un puits comme s'il n'y avait qu'une seule conduite circulaire équivalente localisée au centre du puits. Le débit total spécifié par l'utilisateur circule sur la longueur de puits L_{Sub_k} propre à chaque *Subregion*.

Le modèle DST tient compte des effets thermiques liés à la présence d'un ou de plusieurs tubes en U par puits par le calcul d'une résistance thermique effective, R_b , appelé la résistance thermique du puits.

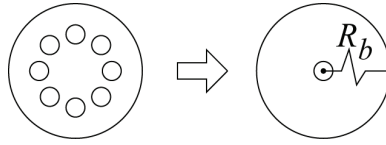


Figure 3.8: Puits contenant quatre tubes en U (huit tuyaux répartis uniformément autour du centre du puits) (à gauche). Modélisation effectuée par le modèle DST (à droite).

La résistance thermique du puits comprend les résistances thermiques associées au coefficient de film à l'intérieur des tuyaux, à la conduction dans les parois des tuyaux et à la conduction dans l'espacement entre les tuyaux et la paroi du puits. Il est à noter que lorsque la résistance thermique du puits considère l'interaction thermique, notée R_a , entre chaque tuyau dans le puits, elle est notée R_b , sinon elle est notée R_b^* . L'inclusion ou non de l'interaction thermique est spécifiée par l'utilisateur.

Hellström (1991) présente la solution au problème de transfert de chaleur dans le puits menant au calcul de la résistance thermique du puits, telle que calculée par le modèle DST. Les sections suivantes résument cette solution.

3.3.7.1 Résistance thermique du puits sans interaction thermique entre les tuyaux, R_b^*

La Figure 3.8 présente le problème de transfert de chaleur dans un puits selon le modèle DST. Chaque tuyau est représenté par une ligne source i à l'intérieur d'un milieu circulaire (le puits) de conductivité thermique λ_b (celui du coulis de remplissage) entouré d'un milieu (le sol) de conductivité thermique λ_g s'étendant à l'infini. Chaque ligne source i produit un taux de transfert de chaleur constant par unité de longueur, q'_i . Il est à noter que les tuyaux sont disposés symétriquement autour du centre du puits dans le modèle DST.

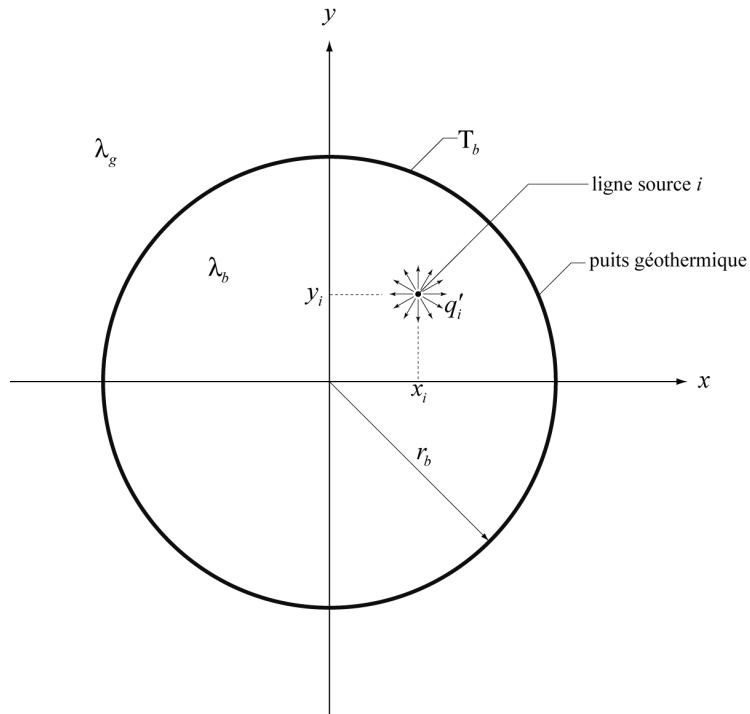


Figure 3.9: Représentation du problème de transfert de chaleur dans un puits.

Les hypothèses, en partie énoncées par Hellström (1991), sont:

- conduction de chaleur régie par un problème 2D permanent;
- chaque tuyau est représenté par une ligne source i ;
- la température du fluide circulant dans chaque tuyau, T_{fi} est constante et est la même pour chaque tuyau;
- la température à la paroi du puits est posée constante sur la circonférence du puits, T_b ;
- Le taux de transfert de chaleur par unité de longueur entre chaque tuyau et la paroi du puits est constant, q'_i et est le même pour chaque tuyau;
- les propriétés thermophysiques du sol et du coulis de remplissage sont constantes; et
- la température initiale du sol et du coulis de remplissage est de 0 °C.

La solution au problème présenté à la Figure 3.8, soit la répartition de la température en régime permanent à l'intérieur d'un puits dans lequel est située une ligne source i , est donnée par:

$$T(x,y) = \frac{q'_i}{2\pi\lambda_b} \left[\ln \left(\frac{r_b}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \right) + \sigma \ln \left(\frac{r_b/b_i}{\sqrt{(x-x'_i)^2 + (y-y'_i)^2}} \right) \right] \quad (3.6)$$

$$\text{où} \quad x'_i = \frac{x_i}{b_i^2}, \quad y'_i = \frac{y_i}{b_i^2}, \quad b_i = \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{r_b}, \quad \sigma = \frac{\lambda_b - \lambda_g}{\lambda_b + \lambda_g}$$

Dans le cas où il y a N lignes sources dans le puits, correspondant à N tuyaux (c'est-à-dire que si $N = 2$, il y a un tube en U dans le puits), la température à la paroi externe du tuyau associé à la ligne source i , T_{p_i} est obtenue par superposition des solutions partielles, en supposant que le rayon externe du tuyau, $r_{p_i, \text{ext}}$ est suffisamment petit pour que l'approximation de la position de la périphérie du tuyau par son centre soit valable:

$$T_{p_i} = \frac{q'_i}{2\pi\lambda_b} \left[\ln \left(\frac{r_b}{r_{p_i, \text{ext}}} \right) + \sigma \ln \left(\frac{r_b/b_i}{\sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2}} \right) \right] + \sum_{\substack{j=1 \\ \text{sauf } j=i}}^N \frac{q'_j}{2\pi\lambda_b} \left[\ln \left(\frac{r_b}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \right) + \sigma \ln \left(\frac{r_b/b_i}{\sqrt{(x_j - x'_i)^2 + (y_j - y'_i)^2}} \right) \right] \quad (3.7)$$

La température entre le fluide circulant dans le tuyau i , T_{f_i} et la paroi externe du tuyau, T_{p_i} est donnée par:

$$T_{f_i} - T_{p_i} = q'_i \cdot R_{p_i} \quad (3.8)$$

La résistance thermique R_{p_i} comprend la résistance du fluide circulant dans le tuyau, la résistance du matériau composant le tuyau et la résistance de l'espace (indice "gap") entre le tuyau et le coulis de remplissage s'il y a lieu, sous la forme d'une somme de résistances thermiques en série (voir Figure 3.10) :

$$R_{p_i} = \frac{1}{5000 \cdot 2\pi r_{p_i, \text{int}}}} + \frac{1}{Nu \cdot \lambda_f \cdot \pi}} + \frac{\ln(r_{p_i, \text{ext}} / r_{p_i, \text{int}})}{2\pi \lambda_p}} + \frac{\ln((r_{p_i, \text{ext}} + L_{\text{gap}}) / r_{p_i, \text{ext}})}{2 \cdot 2\pi \lambda_{\text{gap}}} \quad (3.9)$$

$$\text{avec } Nu \cdot \lambda_f = h_f \cdot 2r_{p_i, \text{int}}$$

où Nu est le nombre de Nusselt, λ_f est la conductivité thermique du fluide et h_f est le coefficient de transfert de chaleur par convection du fluide. Il n'a pas été possible de déterminer l'origine du premier terme de droite de l'Équation 3.9, tel qu'appliqué par le modèle DST. Cependant, dans la plupart des cas, ce terme est négligeable par rapport aux trois autres termes de droite.

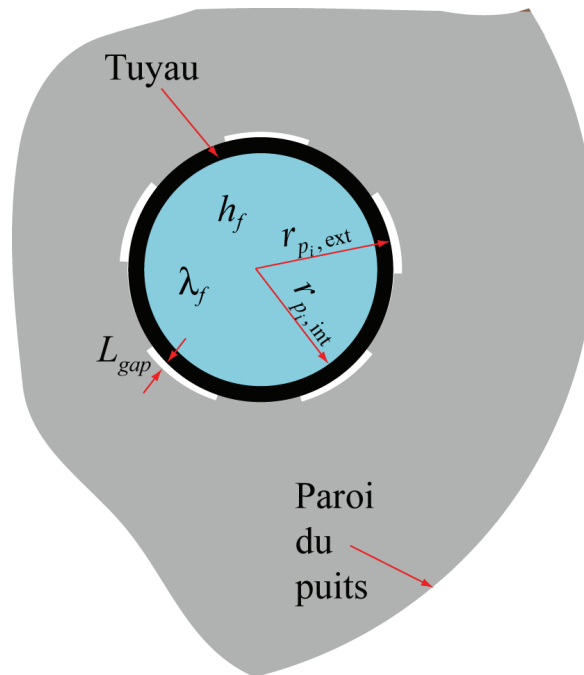


Figure 3.10: Paramètres menant au calcul de R_{p_i} pour un tuyau dans un puits.

Il est à noter que la portion de l'Équation 3.9 attribuable à la résistance thermique causée par un espacement entre la paroi externe d'un tuyau et le coulis de remplissage est divisée deux fois selon l'hypothèse que cet espacement est présent sur 50 % de la surface externe d'un tuyau.

D'autre part, la différence de température entre le fluide circulant dans un tuyau T_{f_i} et la paroi du puits, T_{b_i} peut s'écrire sous la forme générale:

$$T_{f_i} - T_{b_i} = \sum_{j=1}^N R_{ij} \cdot q'_j \quad (3.10)$$

En combinant les Équations 3.7 à 3.9, on obtient les valeurs de résistance R_{ij} :

$$\text{si } i = j \quad R_{ii} = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \left[\ln\left(\frac{r_b}{r_{p_i, \text{ext}}}\right) - \sigma \ln(1 - b_i^2) \right] + R_{p_i} \quad (3.11)$$

$$\text{si } i \neq j \quad R_{ij} = \frac{-1}{2\pi\lambda_b} \left[\ln(b_{ij}) + \sigma \ln(1 - b_{ij}') \right]$$

$$\text{où} \quad b_i = \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{r_b}, \quad b_{ij} = \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{r_b}, \quad b_{ij}' = \frac{\sqrt{(x_i - x_j')^2 + (y_i - y_j')^2}}{r_b/b_i}$$

$$\text{et} \quad \sigma = \frac{\lambda_b - \lambda_g}{\lambda_b + \lambda_g}$$

Ainsi, suivant les Équations 3.10 et 3.11, on construit le système d'équations linéaires suivant:

$$[\mathbf{T}] = [\mathbf{R}][\mathbf{q}], \quad \text{soit} \quad \begin{bmatrix} T_{f_1} - T_b \\ \vdots \\ T_{f_N} - T_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{N1} & \cdots & R_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q'_1 \\ \vdots \\ q'_N \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\text{et où} \quad [\mathbf{R}]^{-1} = [\mathbf{J}], \quad \text{soit} \quad \begin{bmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{N1} & \cdots & R_{NN} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} J_{11} & \cdots & J_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{N1} & \cdots & J_{NN} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Suivant les hypothèses de départ où $T_{f_1} = \dots = T_{f_i} = \dots = T_{f_N} = T_f$ et $q'_1 = \dots = q'_i = \dots = q'_N = q'$, on obtient pour N tuyaux dans un puits, le taux de transfert de chaleur total par unité de longueur passant à travers la paroi du puits, q'_{tot} :

$$\sum_{i=1}^N q'_i = N \cdot q' = q'_{tot} = \frac{T_f - T_b}{R_{tot}} \quad (3.14)$$

Avec les Équations 3.12 à 3.14 la résistance thermique du puits sans l'effet de l'interaction thermique entre les tuyaux, R_b^* est donnée par:

$$R_b^* = R_{tot} = \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^N J_{ij} \right) \right)^{-1} \quad (3.15)$$

Il n'y a qu'une seule valeur de R_b^* , calculée durant l'initialisation d'une simulation et utilisée durant toute la durée de la simulation.

3.3.7.2 Résistance thermique du puits avec interaction thermique entre les tuyaux, R_b

Le modèle DST calcule l'interaction thermique entre les tuyaux par le biais de la résistance thermique R_a . En supposant encore que les tuyaux soient disposés symétriquement autour du centre du puits et à partir des éléments de la matrice $[J]$ donnée à l'Équation 3.13, le modèle DST calcule :

pour 1, 2, 3, 5, 7 ou 9 tubes en U (tel que $N = 2, 4, 6, 10, 14$ ou 18):

$$R_a = \left\{ \sum_{j=1}^{N/2} \left[\left(\sum_{i=1}^{N/2} -J_{i,(\frac{N}{2}+j)} \right) + \left(\frac{1}{\left(\sum_{i=1}^N J_{j,i} \right)} + \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^N J_{(\frac{N}{2}+j),i} \right)} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (3.16)$$

pour 4, 6, 8 ou 10 tubes en U (tel que $N = 8, 12, 16$ ou 20):

$$R_a = \left\{ \sum_{j=1}^{N/2-1} \left[\left(\sum_{i=1}^{N/2} -J_{i,(\frac{N}{2}+j)} \right) + \left(\frac{1}{\left(\sum_{i=1}^N J_{j,i} \right)} + \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^N J_{(\frac{N}{2}+j),i} \right)} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (3.17)$$

La démarche logique menant à l'établissement des Équations 3.16 et 3.17 n'a pas été déterminée et n'est donc pas présentée dans ce mémoire. Ces équations sont tirées du code source du modèle DST.

Finalement, la résistance thermique du puits avec interaction thermique entre les tuyaux, R_b est donnée par:

$$R_b = R_b^* \cdot \eta \cdot \coth(\eta) \quad \text{où } \eta = \frac{H}{c_{p,f} \dot{m}_{f(1\text{puits})} \sqrt{R_b^* R_a}} \quad (3.18)$$

où $c_{p,f}$ est la chaleur spécifique du fluide à pression constante et $\dot{m}_{f,1\text{ puits}}$ est le débit massique de fluide circulant dans un seul puits, c'est-à-dire:

$$\dot{m}_{f,1\text{ puits}} = \frac{\dot{m}_{f,tot}}{(NBH_{tot} / \text{nombre de puits en séries par branche parallèle})}$$

Comme indiqué à l'Équation 3.18, la valeur de R_b dépend du débit du fluide par puits, $\dot{m}_{f(1\text{puits})}$ et est recalculée à chaque pas de temps où le débit varie par rapport au pas de temps précédent.

L'Annexe 4 présente des valeurs de R_b^* , R_b et R_a calculées par le modèle DST pour quelques configurations de tuyaux dans un puits.

Finalement, rappelons qu'un autre mode d'utilisation du Type557 de la librairie TESS (TESS, 2004, version 2.03) de TRNSYS permet la spécification directe par l'utilisateur de la valeur de la résistance thermique du puits.

3.3.8 Méthode de résolution du problème de transfert de chaleur

La résolution du problème de transfert de chaleur dans les maillages *Local* et le maillage *Global* se fait avec la méthode numérique de différences finies avant sous forme explicite. La température d'une maille au temps $t + (dtr \text{ ou } dt \text{ selon le maillage})$ est déterminée par sa température et celle de ses voisines immédiates au pas de temps précédent. Par exemple, tel qu'illustré à la Figure 3.11, la température d'une maille *Global* au temps $t + dt$ est donnée par:

$$(T_{i,j})_{t+dt} = (T_{i,j})_t + (\Delta T_{i,j})_{Local} + (\Delta T_{i,j})_{SF} + \frac{dt}{c_{i,j} V_{i,j} \rho_{i,j}} (q_{r_{i,j}} - q_{r_{i+1,j}} + q_{z_{i,j}} - q_{z_{i+1,j}})_t \quad (3.19)$$

où $q_{r_{i,j}} = \frac{\lambda_g [(T_{i-1,j})_t - (T_{i,j})_t]}{\Delta r} A_{c.s.}$ (le même principe s'applique à $q_{r_{i+1,j}}$, $q_{z_{i,j}}$ et $q_{z_{i+1,j}}$)

avec Δr = distance radiale entre le milieu de deux mailles voisines

$A_{c.s.}$ = surface traversée par $q_{r_{i,j}}$, sous la forme $2\pi r \cdot \Delta z$ (Δz = hauteur de la maille)

Note: $(\Delta T_{i,j})_{Local}$ et $(\Delta T_{i,j})_{SF}$ sont les variations de température causées respectivement par le transfert de chaleur entre les maillages *Local* et les mailles *Global* et par le problème *Steady Flux* (détaillés plus loin).

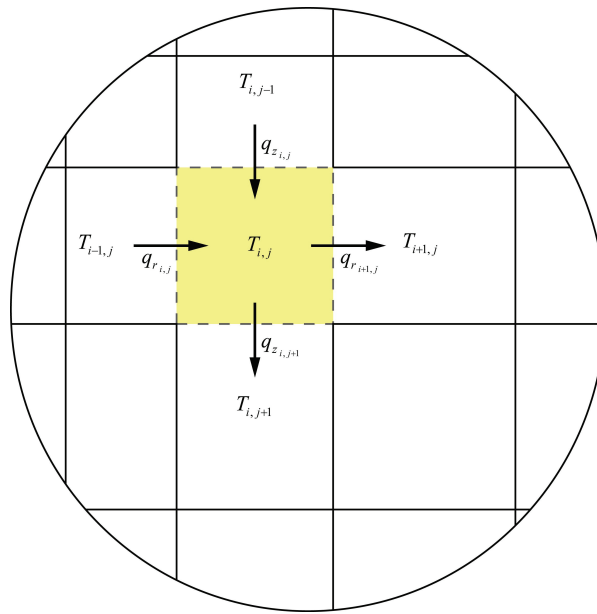


Figure 3.11: Méthode par différence finie pour le problème de conduction dans le sol, sur une maille *Global* de position $x = i$ et $y = j$.

3.3.9 Étapes de calculs

3.3.9.1 Selon le pas de temps court dtr

À chaque pas de temps dtr , la température à la sortie de chaque *Subregion* k est calculée selon :

$$T_{f_k, out} = \beta_k \cdot T_{f_k, in} + (1 - \beta_k) (T_{b_k}) \quad (3.20)$$

$$\text{où: } \beta_k = e^{-\frac{L_{Subk} \cdot G_{Lock,2}}{\dot{m}_{f,tot} \cdot c_{p,f}}}$$

$$G_{Lock,2} = \frac{2\pi\lambda_g}{\ln\left(\frac{\bar{r}_{Lock,2}}{r_{Lock,2}}\right) + (R_b \text{ ou } R_b^*) \cdot 2\pi\lambda_g}$$

$$T_{b_k} = (T_{Lock,2} + T_{Subk}) \quad (\text{principe de superposition})$$

Dans l'Équation 3.20, la température à l'entrée d'une *Subregion* k , $T_{f_k, in}$ est la température à la sortie de la *Subregion* précédente (ou à l'entrée de l'échangeur géothermique dans le cas de la première *Subregion* traversée par le fluide) selon le sens de circulation du fluide spécifié par l'utilisateur (1 à *NLOC* du centre vers la périphérie ou de *NLOC* à 1 pour l'inverse). La température du sol à la paroi du puits de longueur L_{Subk} , T_{b_k} est obtenue selon le principe de superposition, par l'addition de la température de la maille *Local* no.2 du maillage *Local* k (à la paroi du puits, voir Figure 3.6) et de la température moyenne des mailles *Global*, T_{Subk} associées à la *Subregion* k .

Il est à noter que l'Équation 3.20 a la même forme que l'équation classique de transfert de chaleur modélisant la circulation d'un fluide dans une conduite circulaire dont la paroi est maintenue à température constante (Pitts et Sissom, 1997).

Le taux de transfert de chaleur par unité de longueur généré par la circulation du fluide dans une *Subregion* k est posé comme condition frontière dans le maillage *Local* k associé, en r_0 , tel que :

$$q'_{Lock, r_0} = \frac{1}{L_{Subk}} (\dot{m}_{f,tot} \cdot c_{p,f}) (T_{f_k, in} - T_{f_k, out}) \quad (3.21)$$

Les effets thermiques sur chaque maille du maillage *Local* k sont ensuite calculés par la méthode des différences finies avant sous forme explicite.

3.3.9.2 Selon le pas de temps long dt

Entre le début d'une simulation et le temps $t_{Fo=0.2}$ il n'y a aucun échange de chaleur entre le volume de stockage et son environnement. Après $t_{Fo=0.2}$, à chaque pas de temps dt , de la chaleur est transférée des maillages *Local* au maillage *Global* afin de prendre en compte les échanges de chaleur dans l'ensemble du volume de stockage (radialement et verticalement) et entre le volume de stockage et son environnement. Ce transfert de chaleur s'effectue entre les maillages *Local* et les mailles *Global* étant associés à la même *Subregion*. La quantité de chaleur transférée, E_{dt} est égale à la chaleur échangée entre le fluide caloporteur et le maillage *Local* durant la période de temps dt qui s'est terminée il y a un temps égal à $t_{Fo=0.2}$. Tel qu'illustré à la Figure 3.12, pour un maillage *Local* particulier, l'énergie échangée entre le fluide et le maillage *Local* durant dt_1 , soit E_{dt_1} , est transférée aux mailles *Global* associées à la même *Subregion* au temps correspondant à $t_{Fo=0.2} + dt$.

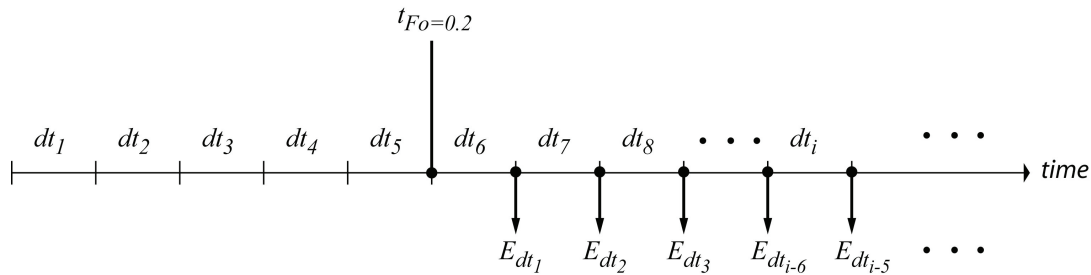


Figure 3.12: Périodes d'échange de chaleur entre les maillages *Local* et le maillage *Global*. Exemple où $dt = (t_{Fo=0.2}) / 5$.

Puisque le maillage *Local* et les mailles *Global* relevant de la même *Subregion* agissent sur le même volume de sol, tel qu'indiqué par l'Équation 3.4, l'énergie échangée résultera en une variation égale, mais de signe inverse, de la température entre les mailles *Local* et *Global* associées à la même *Subregion*.

Les effets thermiques sur l'ensemble des mailles *Global* sont ensuite calculés par la méthode des différences finies avant sous forme explicite. Il est à noter que le calcul de l'échange de chaleur aux limites (au-dessus, en dessous et à la périphérie) du volume de stockage, dont les résultats sont des données de sortie du Type557 (*Heat loss through top/side/bottom of storage*), s'effectue également à chaque pas de temps dt (et non au pas de temps dt_{TRNSYS}) et débute à $t_{Fo=0.2} + 2dt$.

Ceci peut engendrer des discontinuités dans la forme de la courbe d'évolution de la température du fluide à la sortie du volume de stockage. La Figure 3.13 a été tracée pour illustrer ce phénomène. Il s'agit de l'évolution de la température du fluide à la sortie d'un puits géothermique standard (longueur de 150 m, volume de stockage de 811.8 m^3 , diamètre du puits de 10 cm, un tube en U, conductivité thermique du coulis et du sol de $2.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, diffusivité thermique de $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, température non perturbée du sol de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ et débit du fluide (eau) de $800 \text{ kg}\cdot\text{hr}^{-1}$) soumis à une charge thermique constante de $9\,000 \text{ W}$. Les zones encadrées, sur la courbe associée au modèle DST, correspondent à des périodes d'échange de chaleur entre les maillages *Local* et le maillage *Global*. Ces zones montrent clairement une variation non attendue de la température du fluide à la sortie du puits. Cette baisse, de l'ordre de $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ à la Figure 3.13, est liée à la diminution de la température du volume de stockage causée par un transfert de chaleur du volume de stockage vers son environnement au-dessus, au-dessous et à sa périphérie. Les résultats du modèle proposé, (la description du modèle proposé est présentée au Chapitre 4) pour le même cas, sont également présentés à la Figure 3.13. Il est à noter que les deux modèles utilisent la même valeur de résistance thermique du puits. L'écart entre les deux modèles est principalement causé par la différence au niveau de la modélisation du transfert de chaleur à l'intérieur du puits propre à chaque modèle.

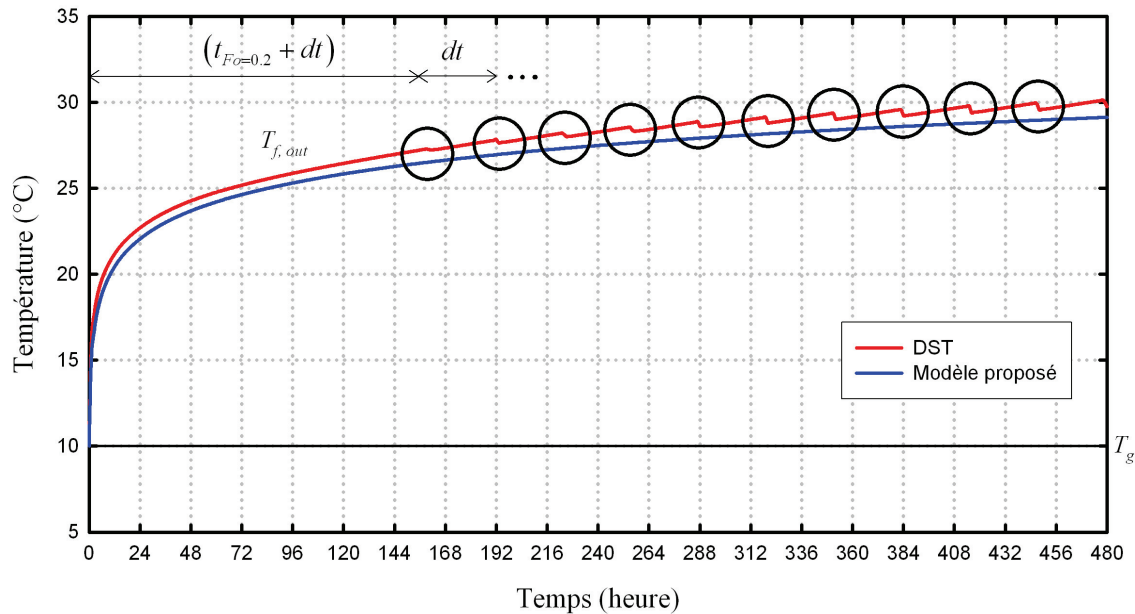


Figure 3.13: Température du fluide à la sortie du volume de stockage calculée par le modèle DST. Les discontinuités sont encadrées.

3.3.10 Problème Steady flux

La présence et la signification du problème *Steady flux* n'ayant pas été éclaircie suite à l'étude du modèle DST, les informations contenues dans cette section se limitent à une explication sur la procédure d'application du problème *Steady flux* et à une description des effets thermiques entraînés.

Seulement dans le cas des mailles *Global* couvrant le volume de stockage, le modèle DST ajuste leur température selon le problème *Steady flux* à chaque pas de temps dt suivant $t_{Fo=0.2}$. La contribution du problème *Steady flux* est relativement négligeable, généralement de l'ordre de 10^{-1} °C ou moins par maille *Global*.

Le problème *Steady flux* a une solution par *Subregion*. L'effet de la solution au problème *Steady flux* est de redistribuer la chaleur entre les mailles *Global* associées à la même *Subregion*. La redistribution s'effectue suivant la différence de température entre la température moyenne des mailles *Global* associées à la *Subregion* k , T_{Sub_k} et leur température individuelle $T_{i,j}$. L'effet de la solution au problème *Steady flux* sur les mailles *Global* associées à une *Subregion* k est de rapprocher la température de chaque maille *Global* vers la température moyenne T_{Sub_k} . Il est à noter que la somme des effets sur l'ensemble des mailles *Global* associées à une même *Subregion* est nulle et ainsi, s'il n'y a qu'une seule maille *Global* associé à une *Subregion*, sa température ne sera pas modifiée par le problème *Steady flux*. La variation de température que subit une maille *Global* comprise dans une *Subregion* k causée par le problème *Steady flux* est donné par :

$$(\Delta T_{i,j})_{SF} = (T_{Sub_k} - T_{i,j}) \left(1 - \exp \left(\frac{-\lambda_g \cdot V_{Sub_k}}{l^2 \cdot \dot{m}_{f,tot} \cdot c_{p,f}} \right) \right) (\dot{m}_{f,tot} \cdot c_{p,f}) \left(\frac{V_{i,j}}{V_{Sub_k}} \right) (c_{p,i,j} \cdot V_{i,j})^{-1} dt \quad (3.22)$$

$$\text{avec:} \quad l^2 = \frac{r_1^2}{2} \left(\ln \left(\frac{r_1}{r_0} \right) - \frac{3}{4} + (2\pi\lambda_g \cdot R_b^*) \right)$$

3.3.11 Température moyenne du volume de stockage

La température moyenne du volume de stockage est calculée à chaque pas de temps spécifié dans le studio TRNSYS, dt_{TRNSYS} par l'addition de l'énergie contenue dans l'ensemble des mailles *Local* et des mailles *Global* couvrant le BTES.

3.4 Modèle DST modifié

Le modèle DST, tel que décrit précédemment, n'accepte qu'une seule température d'entrée du fluide caloporteur au volume de stockage. Il n'est pas possible, par exemple, d'alimenter une partie du réseau de tubes en U d'un échangeur géothermique à une température T_1 et l'autre à une température T_2 , ni d'étudier les interactions thermiques entre deux échangeurs géothermiques voisins alimentés à des températures et à des débits distincts. Dans le cas du modèle DST, il n'y a qu'un seul réseau de tubes en U pour un seul échangeur géothermique.

Dans l'idée d'étudier les performances d'un échangeur géothermique constitué de deux réseaux de tubes en U indépendants, le modèle DST a été modifié (Type257) (Chapuis et Bernier, 2009) et est présenté dans cette section. Brièvement, le concept des deux réseaux de tubes en U indépendants a été émis dans l'intention de fournir une alternative aux systèmes de stockage conventionnels (voir la Figure 2.1). Cette alternative implique l'insertion de deux tubes en U par puits au lieu d'un seul, soit un pour chaque réseau indépendant, la suppression des réservoirs de courte durée et une simplification du système de distribution du fluide entre les éléments du système d'échangeur géothermique avec stockage saisonnier par recharge solaire. Un exemple d'application du modèle DST modifié est présenté à la section 6.4.

Bien que le modèle DST modifié puisse tenir compte de deux réseaux de tubes en U dans un échangeur géothermique, ces deux réseaux restent liés par les puits de l'échangeur géothermique, c'est-à-dire que chaque puits contient un nombre (1 à 10) de tubes en U associé au premier réseau et un autre nombre (1 à 10) de tubes en U associés au deuxième réseau. Le modèle DST modifié permet aussi de spécifier le sens de l'écoulement du fluide dans l'échangeur géothermique de façon indépendante pour chaque réseau de tubes en U, soit du centre vers la périphérie ou inversement.

Les principales modifications apportées au modèle DST relèvent de l'étape de calcul de transfert de chaleur du problème *Local*. Ainsi, le modèle DST modifié calcule deux (au lieu d'un seul) flux de chaleur au rayon r_0 (c'est-à-dire un pour chaque réseau de tubes en U indépendants) pour chaque maillage *Local* à chaque pas de temps dtr . Les deux valeurs de flux de chaleur sont ensuite additionnées. Le résultat est alors établi comme la nouvelle condition frontière en r_0 . Après cette étape, le code DST modifié est le même que le code DST original.

Le modèle DST modifié calcule également deux résistances R_b distinctes, soit une pour chaque réseau de tubes en U, selon le processus décrit à la section 3.3.7. L'emploi de la résistance R_b , telle que calculée par le modèle DST, est considéré correct dans le cas où les deux réseaux de tubes en U ne fonctionnent pas simultanément, mais reste à être validé lorsque les deux réseaux fonctionnent simultanément. Lors du fonctionnement simultané des deux tubes en U dans un puits, l'interaction thermique entre les tuyaux n'appartenant pas au même tube en U à l'intérieur du puits n'est pas prise en compte dans la valeur de R_b . L'interaction thermique entre les deux tubes en U d'un même puits se fait par la valeur de la température du sol à la paroi du puits qui est influencée par chaque tube en U.

Il est à noter que l'effet de l'implantation d'un second réseau de tubes en U sur la solution au problème *Steady flux* n'est pas pris en compte par le modèle DST modifié. Selon l'Équation 3.22, le débit, \dot{m}_f et la chaleur spécifique, $c_{p,f}$ du fluide circulant dans l'échangeur géothermique entrent dans le calcul de la solution au problème *Steady flux*. Rappelons que bien que la signification du problème *Steady flux* n'ait pas été déterminée, son effet est négligeable sur une maille *Global* (de l'ordre de 10^{-1} °C) et nul sur l'ensemble des mailles *Global* associées à une *Subregion*.

3.5 Résumé

La version Type557, avec tubes en U et résistance thermique du puits calculée, du modèle DST est étudiée dans ce chapitre. Le modèle DST est un modèle d'échangeur géothermique distribuant les puits de manière uniforme dans un volume cylindrique de stockage. Une configuration hexagonale des puits est la configuration réelle se rapprochant le plus de la modélisation effectuée par le modèle DST (puits répartis uniformément autour du centre du volume de stockage). La modélisation de l'échange thermique dans le sol se fait par l'utilisation d'un maillage 2D axisymétrique par rapport au centre du volume de stockage. Des maillages plus raffinés sont utilisés autour des puits pour modéliser le transfert de chaleur à court terme. Le calcul du transfert de chaleur dans le sol entourant un puits et dans le sol entourant le volume de stockage est réalisé par la méthode numérique des différences finies avant. Le calcul du transfert de chaleur entre le fluide et le sol à la paroi du puits utilise une résistance thermique effective du puits pouvant tenir compte ou non de l'interaction thermique entre les tuyaux d'un puits. La température du sol est calculée par l'addition de l'effet de trois solutions partielles au problème de transfert de chaleur dans le sol: une solution dans le sol immédiatement autour du puits (dite *Local*), une solution dans le sol composant le volume de stockage et dans le sol environnant (dite *Global*) et une solution corrective de la solution *Global* (dite *Steady Flux*).

Suite à son analyse, le modèle DST a été modifié pour la modélisation de deux réseaux de tubes en U (un seul peut être modélisé dans le modèle DST original) indépendants dans l'intention de fournir une alternative aux systèmes de stockage conventionnels. Chaque réseau de tubes en U possède sa propre température d'entrée et son propre débit d'entrée dans le volume de stockage. Les principales modifications au modèle DST ont été apportées sur la solution partielle *Local* où l'échange thermique entre le fluide et le sol à la paroi d'un puits a lieu.

CHAPITRE 4 DESCRIPTION DU MODÈLE PROPOSÉ

4.1 Introduction

Le modèle proposé dans ce mémoire présente une nouvelle approche de modélisation. Elle s'appuie sur l'utilisation de la source linéique finie combinée aux méthodes de superposition spatiale et temporelle. Ce modèle permet de combler les principales lacunes du modèle DST, dont l'impossibilité pour l'utilisateur de pouvoir définir l'emplacement des puits et les limitations de configuration à des champs de puits cylindriques / hexagonaux où les puits sont répartis uniformément autour du centre du volume de stockage. Le modèle proposé permet également de tenir compte de deux réseaux indépendants de puits géothermiques ayant chacun sa propre température d'entrée et son propre débit de fluide tandis que le modèle DST est limité à un seul réseau de puits. Les sections suivantes décrivent le modèle proposé.

4.2 Type272

Le modèle proposé dans ce chapitre est un modèle d'échangeur géothermique vertical en boucle fermée développé à la suite des travaux de Costes et Peysson (2008). Ce modèle a été développé pour une utilisation dans l'environnement du programme TRNSYS et il porte l'appellation "Type272". Un exemple d'application du modèle proposé est présenté au Chapitre 6. L'Annexe 6 présente un guide d'utilisation du Type272.

La solution au problème de transfert de chaleur dans le sol est obtenue par l'utilisation d'une solution analytique au problème de conduction de la chaleur bidimensionnel (r,z) en régime transitoire autour de chaque puits. L'application du principe de superposition permet de tenir compte des interactions thermiques entre l'ensemble des puits dans le temps. La conductivité thermique effective du sol ainsi que la résistance thermique du puits, telles que définies à la section 2.1.1, sont également utilisées dans le modèle proposé.

La solution analytique au problème de conduction de la chaleur autour d'un puits utilisée par le modèle proposé est tirée des travaux de Lamarche et Beauchamp (2007) et est dérivée de la solution analytique du modèle de la source linéique finie présentée par Zeng et al. (2002). L'effet de la variation du taux de transfert de chaleur entre un puits et le sol dans le temps est pris en

compte par la méthode MLAA (*Multiple Load Aggregation Algorithm*) présentée par Bernier et al. (2004).

4.2.1 Source linéique finie

Zeng et al. (2002) présentent un modèle de puits géothermique, soit le modèle de la source linéique finie (SLF) permettant de déterminer la variation de la température dans le sol, en régime transitoire 2D (r, z) de conduction pure, causée par une ligne source verticale de longueur finie d'où émane un taux de transfert de chaleur constant par unité de longueur.

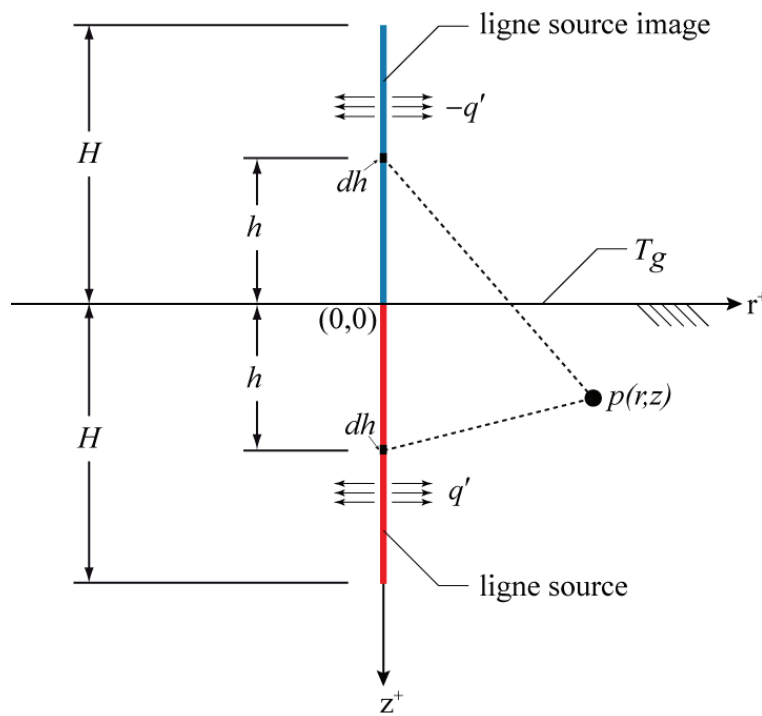


Figure 4.1: Géométrie considérée par le modèle de la ligne source finie.

Les hypothèses énoncées par les auteurs sont :

- le sol est un milieu homogène semi-infini dont les propriétés thermophysiques sont constantes ;
- La température initiale, non perturbée, du sol, T_g est uniforme ;

- La surface du sol, soit la frontière du milieu semi-infini, est maintenue à T_g tout au long de la période étudiée ;
- La ligne source de longueur finie est assimilable à un puits de dimension radiale négligeable, de longueur H à partir de la surface du sol ; et
- Le taux de transfert de chaleur par unité de longueur de la ligne source, q' est constant tout au long de la période étudiée.

Sans indiquer l'origine de la solution, les auteurs expriment tout d'abord la variation de la température dans un milieu infini au temps t , en un point $p(r,z)$, causée par un point source dh (vue comme un élément de longueur infinitésimale) d'où émane un taux de transfert de chaleur constant q (où $q = q' \cdot dh$), comme étant :

$$\Delta T(r,z,t) = \frac{q' dh}{4\lambda_g \pi \sqrt{r^2 + (z-h)^2}} \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha_g t}} \right) \quad (4.1)$$

Il est à noter que l'Équation 4.1 est également présentée par Carslaw et Jaeger (1959) et Ingersoll et al. (1948) pour le même cas.

La solution au problème en régime transitoire de la distribution de température dans le sol pour une ligne source verticale de longueur H débutant à la surface du sol ($z = 0$) et dégageant un taux de transfert de chaleur par unité de longueur, q' constant est obtenue à partir de l'Équation 4.1 et selon le principe des images illustré à la Figure 3.11, selon :

$$\Delta T_{0 \rightarrow H}(r,z,t) = T(r,z,t) - T_g = \frac{q'}{4\lambda_g \pi} \int_0^H \left[\frac{\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{\alpha_g t}} \right)}{\sqrt{r^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{\alpha_g t}} \right)}{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}} \right] dh \quad (4.2)$$

L'utilisation du principe de superposition et de l'Équation 4.2 permet de trouver une solution pour le cas où un puits de longueur H débute à une profondeur D sous la surface du sol:

$$\Delta T_{D \rightarrow (D+H)}(r,z,t) = \Delta T_{0 \rightarrow (D+H)}(r,z,t) - \Delta T_{0 \rightarrow D}(r,z,t) \quad (4.3)$$

4.2.2 Solutions dérivées de la source linéique finie

Lamarche et Beauchamp (2007) présentent une solution dérivée du modèle SLF, permettant de calculer la température moyenne le long d'un puits de longueur H , situé entre $z = 0$ et $z = H$, pour une distance r à partir du puits, $\Delta T_{moy, 0 \rightarrow H}(r, t)$ en régime transitoire:

$$\Delta T_{moy, 0 \rightarrow H}(r, t) = T_{moy}(r, t) - T_{g, moy}(t) = \frac{q'}{2\pi\lambda_g} I_{0 \rightarrow H}(r, t) \quad (4.4)$$

où

$$I_{0 \rightarrow H}(r, t) = \left\{ \int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \frac{\text{erfc}(\gamma z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_A - \int_{\sqrt{\beta^2+1}}^{\sqrt{\beta^2+4}} \frac{\text{erfc}(\gamma z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_B \right\}$$

$$D_A = \int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \text{erfc}(\gamma z) dz = \sqrt{\beta^2+1} \cdot \text{erfc}\left(\gamma\sqrt{\beta^2+1}\right) - \beta \cdot \text{erfc}(\gamma\beta) - \frac{e^{-\gamma^2(\beta^2+1)} - e^{-\gamma^2\beta^2}}{\gamma\sqrt{\pi}}$$

$$D_B = \frac{1}{2} \left(\int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \text{erfc}(\gamma z) dz + \int_{\sqrt{\beta^2+1}}^{\sqrt{\beta^2+4}} \text{erfc}(\gamma z) dz \right)$$

$$= \sqrt{\beta^2+1} \cdot \text{erfc}\left(\gamma\sqrt{\beta^2+1}\right) - 0,5\beta \cdot \text{erfc}(\gamma\beta) + \sqrt{\beta^2+4} \cdot \text{erfc}\left(\gamma\sqrt{\beta^2+4}\right) - \left(\frac{e^{-\gamma^2(\beta^2+1)} - 0,5(e^{-\gamma^2\beta^2} + e^{-\gamma^2(\beta^2+4)})}{\gamma\sqrt{\pi}} \right)$$

avec

$$\beta = \frac{r}{H}, \gamma = \frac{H}{2\sqrt{\alpha_g \cdot t}}$$

Suivant les travaux de Lamarche et Beauchamp (2007), Costes et Peysson (2008) donnent une solution de même nature pour le cas où un puits de longueur H débute à une profondeur D sous la surface du sol:

$$\Delta T_{moy, D \rightarrow (D+H)}(r, t) = T_{moy}(r, t) - T_{g, moy}(t) = \frac{q'}{2\pi\lambda_g} I_{D \rightarrow (D+H)}(r, t) \quad (4.5)$$

où

$$I_{D \rightarrow (D+H)}(r, t) = \left\{ \int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \frac{\operatorname{erfc}(\gamma z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_A + \frac{D}{H} \int_{\sqrt{\beta^2 + \left(\frac{2D}{H}\right)^2}}^{\sqrt{\beta^2 + \left(1 + \frac{2D}{H}\right)^2}} \frac{\operatorname{erfc}(\gamma z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - \left(1 + \frac{D}{H}\right) \int_{\sqrt{\beta^2 + \left(\frac{2D}{H}\right)^2}}^{\sqrt{\beta^2 + \left(2 + \frac{2D}{H}\right)^2}} \frac{\operatorname{erfc}(\gamma z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz - D_C \right\}$$

$$D_A = \int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \operatorname{erfc}(\gamma z) dz = \sqrt{\beta^2+1} \cdot \operatorname{erfc}\left(\gamma\left(\sqrt{\beta^2+1}\right)\right) - \beta \cdot \operatorname{erfc}(\gamma\beta) - \frac{e^{-\gamma^2(\beta^2+1)} - e^{-\gamma^2\beta^2}}{\gamma\sqrt{\pi}}$$

$$D_C = \left(a_1 \cdot \operatorname{erfc}(\gamma a_1) - e^{\left(\frac{-\gamma^2 a_1^2}{\gamma\sqrt{\pi}}\right)}\right) - \frac{1}{2} \left(a_2 \cdot \operatorname{erfc}(\gamma a_2) - e^{\left(\frac{-\gamma^2 a_2^2}{\gamma\sqrt{\pi}}\right)}\right) - \frac{1}{2} \left(a_3 \cdot \operatorname{erfc}(\gamma a_3) - e^{\left(\frac{-\gamma^2 a_3^2}{\gamma\sqrt{\pi}}\right)}\right)$$

avec

$$a_1 = \sqrt{\beta^2 + \left(1 + \frac{2D}{H}\right)^2}; \quad a_2 = \sqrt{\beta^2 + \left(2 + \frac{2D}{H}\right)^2}; \quad a_3 = \sqrt{\gamma^2 + \left(\frac{2D}{H}\right)^2}$$

$$\gamma = \frac{H}{2\sqrt{\alpha_g t}}; \quad \beta = \frac{r}{H}$$

Aux Équations 4.4 et 4.5, $T_{g, moy}(t)$ est la température non perturbée moyenne du sol sur la longueur d'un puits. Plus de détails sur l'évaluation de cette valeur sont donnés à la section 4.2.8. La température moyenne du sol, $T_{moy}(r, t)$ sur la longueur d'un puits et au rayon d'un puits est obtenue en remplaçant r par r_b dans l'Équation 4.4 ou 4.5.

Pour la résolution de la fonction $I(r, t)$ présentée aux Équations 4.4 et 4.5, le modèle proposé utilise, entre autres, deux routines en langage Fortran disponibles en code source libre. La routine DQAG (Piessens, non daté) permet la résolution numérique d'une intégrale définie, par la méthode de Gauss-Kronrod. La routine DERFC (IMLS, 1978) permet l'évaluation de la fonction

erreur complémentaire. La validité de ces deux routines a été confirmée dans les travaux de Costes et Peysson (2008).

4.2.3 Application du principe de superposition

Le principe de superposition (additivité des solutions partielles) en accord avec la forme linéaire de l'équation de conduction de la chaleur est appliquée par le modèle proposé dans le cas où il y a plus d'un puits et aussi lorsque le taux de transfert de chaleur entre un puits et le sol varie dans le temps.

4.2.3.1 Interactions entre plusieurs puits

Lorsqu'il y a plus d'un puits pouvant influencer la température en un point p considéré du sol, la solution à la variation de température en ce point est obtenue par l'addition des solutions à la variation de température causée par chaque puits, c'est-à-dire prise individuellement, en ce point. Ainsi, pour un nombre m de puits (supposons pour l'instant que chaque puits fournit un taux de transfert de chaleur constant par unité de longueur) pouvant influencer la température en ce point du sol, la température en ce point est donnée, suivant l'Équation 4.4 ou 4.5, par:

$$T_p(t) = \left(\sum_{i=1}^m \Delta T_i(r_{i \rightarrow p}, t) \right) + T_{g, moy}(t) \quad (4.6)$$

Par exemple, dans un même ordre d'idées mais d'une autre façon, supposons qu'un point soit entouré de trois puits, tous situés à une distance égale de ce point et fournissant chacun une puissance respective de 4, 5 et 6 Watts, alors la solution à la variation de température en ce point causée par les trois puits est la même que si l'on ne considérait qu'un seul des trois puits fournissant une puissance équivalente de $4+5+6=15$ Watts.

Le lecteur est référé à l'article de Sheriff et Bernier (2008) pour un exemple de l'application de l'Équation 4.6 pour trois puits en ligne.

4.2.3.2 Taux de transfert de chaleur variable

Lorsque le taux de transfert de chaleur entre un puits et le sol varie dans le temps par intervalles (voir la Figure 4.2, à gauche), une méthode de superposition temporelle doit être utilisée (Yavuzturk et Spitler (1999) et Eskilson (1987)). Cette technique consiste à additionner les effets d'une série de taux de transfert de chaleur équivalents (voir la Figure 4.2, à droite) afin de recréer

l'effet du problème à profil variable initial. La solution à la variation de température en un point du sol, suivant la forme de l'Équation 4.4 ou 4.5, pour un puits de longueur H , est ainsi donnée par :

$$\Delta T(r,t) = T(r,t) - T_{g,moy}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{(q_i - q_{i-1})}{2\pi\lambda_g \cdot H} I(r,t_i) \quad (4.7)$$

La Figure 4.2 présente un exemple d'application de l'Équation 4.7 pour un cas où $N = 5$.

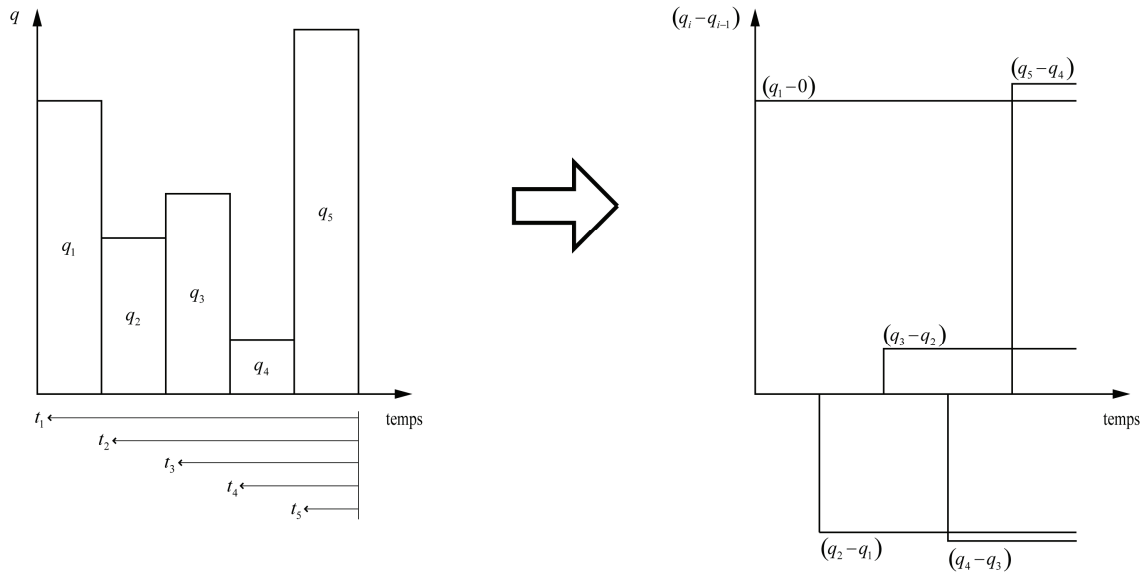


Figure 4.2: Exemple de profil de taux de transfert de chaleur variable (à gauche) adapté selon le principe de superposition (à droite).

Pour diminuer le temps de calcul associé à la résolution de l'Équation 4.7, Bernier et al. (2004) proposent la méthode MLAA (*Multiple Load Aggregation Algorithm*), une méthode d'agrégation des charges thermiques au sol, q_i . Selon cette méthode, cinq intervalles successifs de temps sont utilisés entre l'instant d'intérêt et le début de l'application des charges au sol (à $t = 0$). Ces intervalles sont notés en ordre par $\Delta t_h, \Delta t_d, \Delta t_w, \Delta t_m$ et Δt_y , tels que présentés à la Figure 4.3. À la Figure 4.3, les temps t_h, t_d, t_w, t_m et t_y sont calculés depuis le temps t où l'on désire connaître la température du sol. L'intervalle Δt_h couvre une période ayant eue lieu immédiatement avant l'instant considéré t et durant cet intervalle, le calcul des effets thermiques se fait sans que les

charges soient agrégées, selon l'Équation 4.7. Pour les intervalles $\Delta t_d, \Delta t_w, \Delta t_m$ et Δt_y , les charges sont agrégées en prenant leur valeur moyenne sur chaque intervalle, q_d, q_w, q_m, q_y . L'intervalle Δt_y couvre la période suivant l'intervalle Δt_m jusqu'au début de l'application des charges ($t = 0$). Suivant la méthode MLAA, la solution à la variation de température en un point du sol, suivant la forme de l'Équation 4.4 ou 4.5 pour un puits de longueur H , est donnée par:

$$\begin{aligned} \Delta T(r,t) &= T(r,t) - T_{g,moy}(t) \\ &= \frac{1}{2\pi\lambda_g \cdot H} \left[(q_y - 0)I(r, t_y) + (q_m - q_y)I(r, t_m) \right. \\ &\quad + (q_w - q_m)I(r, t_w) + (q_d - q_w)I(r, t_d) + (q_{h_1} - q_d)I(r, t_{h_1}) \\ &\quad \left. + (q_{h_2} - q_{h_1})I(r, (t_h - 1 \cdot \frac{t_h}{N})) + \dots + (q_{h_i} - q_{h_{i-1}})I(r, (t_h - 2 \cdot \frac{t_h}{N})) + \dots + (q_{h_N} - q_{h_{N-1}})I(r, (\frac{t_h}{N})) \right] \end{aligned} \quad (4.8)$$

où N est le nombre de charges q durant l'intervalle Δt_h

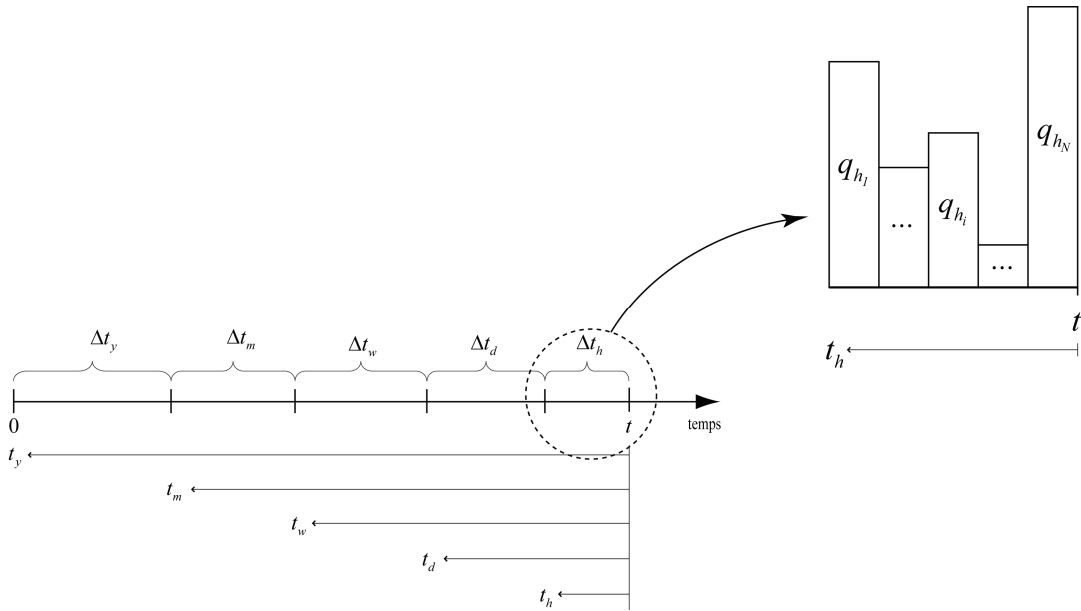


Figure 4.3: Représentation schématique de la méthode MLAA.

Bernier et al. (2004) utilisent des intervalles de durées $\Delta t_h = 12$, $\Delta t_d = 48$, $\Delta t_w = 168$ et $\Delta t_m = 720$ heures lors d'une simulation particulière à pas de temps d'une heure et à charge variable afin de démontrer que la méthode MLAA donne des résultats comparables à ceux obtenus en tenant compte de toutes les charges prises individuellement (c'est-à-dire de manière non agrégée). Pour

le Type272, l'utilisateur doit spécifier le nombre de pas de temps à considérer pour les intervalles $\Delta t_h, \Delta t_d, \Delta t_w, \Delta t_m$. L'intervalle Δt_y est variable et est ajusté automatiquement par le Type272 durant une simulation.

4.2.4 Résistance thermique d'un puits

Contrairement au modèle DST, le Type272 ne calcule pas la résistance thermique du puits, R_b et celle-ci doit être spécifiée par l'utilisateur. Afin d'obtenir les résultats les plus précis lors d'une simulation, la valeur de R_b devrait être définie à la suite d'un essai de réponse thermique *in situ* tel qu'expliqué à la section 2.1.1. Bien que la méthode décrite à la section 2.1.1 soit basée sur l'utilisation de l'équation de la ligne source infinie pour le calcul de λ_g et de R_b , ces valeurs peuvent être appliquées à la méthode de la ligne source finie lorsque la longueur des puits est suffisante (c'est-à-dire lorsque les effets de bouts ne sont plus significatifs et que le transfert de chaleur radial prédomine). Pour le Type272, tous les puits ont la même résistance R_b durant une simulation.

Jusqu'à présent, la méthode SLF adaptée par Lamarche et Beauchamp (2007) et implantée dans le Type272 a été décrite comme un modèle de puits géothermique. Cependant, cette méthode peut également servir de modèle pour chaque tuyau composant le ou les tubes en U d'un puits. Dans ce cas, l'utilisateur doit spécifier un nombre de puits correspondant au nombre de tuyaux composant l'ensemble des tubes en U d'un puits. La résistance thermique du puits R_b devient alors la résistance thermique entre le fluide et la paroi externe des tuyaux. De plus, le coulis de remplissage du puits doit avoir la même conductivité thermique que le sol. Un exemple d'utilisation du Type272 dans ce contexte est présenté au Chapitre 6.

4.2.5 Réseaux de puits

Le modèle proposé offre la possibilité de tenir compte d'un ou de deux réseaux indépendants de puits géothermiques ayant chacun sa propre température d'entrée et son propre débit de fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique. Sauf erreur, aucun autre modèle de champs de puits géothermique commercialisé (incluant le modèle DST) ne permet une telle application. Cette application a été implantée dans le but de diversifier les modes d'opération possible du système géothermique. Par exemple, les deux réseaux indépendants de puits peuvent être utilisés dans le but de simuler :

- un arrangement à deux tubes en U indépendants par puits ;
- un échangeur géothermique stockant l'énergie solaire et climatisant simultanément un bâtiment par deux réseaux distincts de puits;
- les interactions entre deux échangeurs géothermiques suffisamment près l'un de l'autre pour s'influencer thermiquement; etc.

Bien que les deux réseaux indépendants de puits portent les appellations *Charge* (chauffage du sol) et *Discharge* (chauffage des bâtiments) dans le *proforma* du Type272, ils peuvent également fonctionner tous les deux en mode *Charge* ou tous les deux en mode *Discharge*.

4.2.6 Emplacement des puits et des nœuds supplémentaires

Pour chaque réseau indépendant de puits, l'utilisateur définit l'emplacement des puits par leurs coordonnées cartésiennes sous la forme d'un binôme (x,y) dans un fichier format texte. Ces coordonnées sont importées par le Type272 lors de l'initialisation de la simulation.

Si l'utilisateur désire suivre l'évolution de la température du sol en certains points du sol, il peut utiliser des nœuds supplémentaires en inscrivant leurs coordonnées cartésiennes, également sous la forme d'un binôme (x,y) à la suite des coordonnées des puits dans le même fichier format texte. La température calculée de chaque nœud est la température moyenne du sol le long d'une ligne verticale débutant à la même profondeur et ayant la même longueur qu'un puits.

4.2.7 Configuration des puits

Pour chaque réseau indépendant de puits, le modèle proposé permet de disposer les puits par branches de puits en série. Les branches de puits en série d'un même réseau ont la même température du fluide à leur entrée, mais ont leur propre débit de fluide, selon une fraction du débit total circulant dans le réseau, fixée par l'utilisateur.

La Figure 4.4 présente un exemple général de configuration des puits avec deux réseaux indépendants et quelques nœuds supplémentaires, tel qu'il est possible de le spécifier avec le modèle proposé. Le réseau no.1 est formé de deux branches de puits en série, soit une branche de deux puits en série et une branche de trois puits en séries. Le réseau no.2 est aussi formé de deux branches de puits en série, soit une branche de deux puits en série et une branche de un puits.

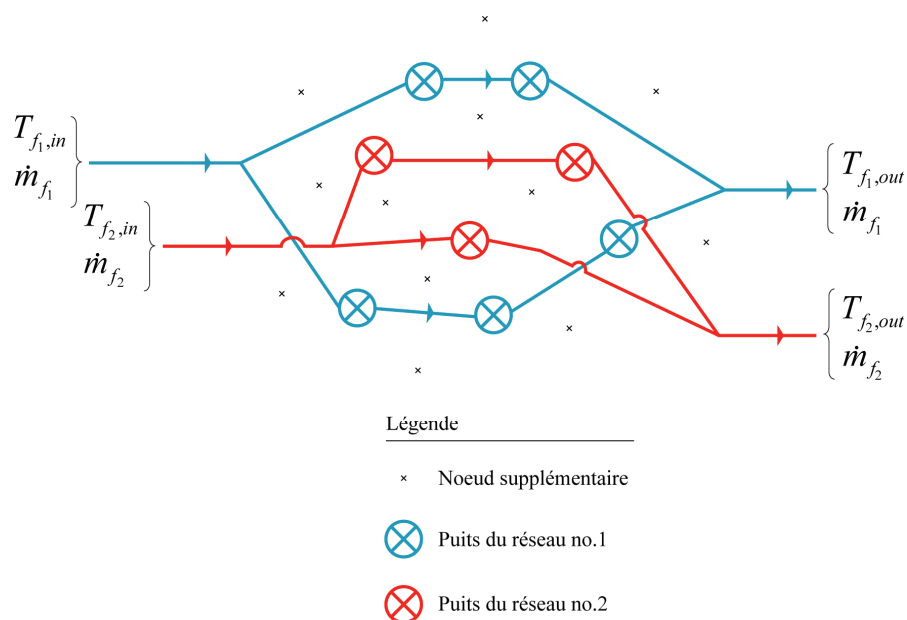


Figure 4.4: Exemple de configuration possible des puits et de nœuds supplémentaires selon le Type272.

La Figure 4.5 montre un exemple de configuration des puits qui ne peut pas être réalisée avec le modèle proposé, c'est-à-dire qu'une branche de puits en série soit connectée à plusieurs branches de puits en série. Ainsi, les branches de puits en série doivent toujours être connectées en parallèle, tel qu'illustré à la Figure 4.4.

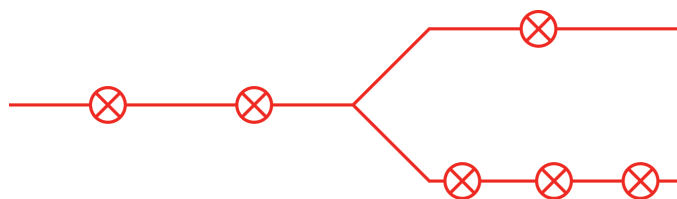


Figure 4.5: Exemple de configuration de puits qui ne peut être modélisée avec le Type272.

4.2.8 Température non perturbée du sol

Selon les spécifications de l'usager, le modèle proposé peut initialiser la température non perturbée du sol en fonction de la période de l'année. En supposant un profil sinusoïdal de température non perturbée de la surface du sol, la température non perturbée du sol selon la profondeur, $T_g(z, t)$ est donnée par (Lunardini (1981) et Andersland et Ladanyi (2004)):

$$T_g(z, t) = T_0 + g \cdot z - T_1 \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{t_c \cdot \alpha_g}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot (t - n)}{t_c} - z \sqrt{\frac{\pi}{t_c \cdot \alpha_g}}\right) \quad (4.9)$$

où T_0 est la température non perturbée moyenne annuelle de la surface du sol (que l'on considère généralement égale à la température annuelle moyenne de l'air), g est le gradient géothermique, T_1 est la demi-amplitude de la variation de la température non perturbée à la surface du sol, n est le nombre de jours après le 1^{er} janvier où la température non perturbée à la surface du sol est minimum dans l'année et t_c est le temps d'un cycle, soit une année. Il est à noter que le modèle proposé dans sa version actuelle ne tient pas compte du gradient géothermique (c'est-à-dire le deuxième terme de l'Équation 4.9). Cependant, l'usager peut tenir compte de cet effet de façon approximative en modifiant T_0 pour tenir compte de la température moyenne du sol sur la hauteur du puits (Eskilson, 1987).

La Figure 4.6 montre un exemple de l'évolution de la température non perturbée du sol en fonction de la profondeur pour quatre jours de l'année pour les paramètres suivants: $T_0 = 10\text{ °C}$, $T_1 = 10\text{ °C}$, $\alpha_g = 10^{-6}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $n = 0$, $t_c = 31\,536\,000\text{ s}$ (1 année) et $g = 0$. Tel que montré sur la figure, la température non perturbée du sol est constante et égale à 10 °C pour des profondeurs supérieures à environ 15 mètres.

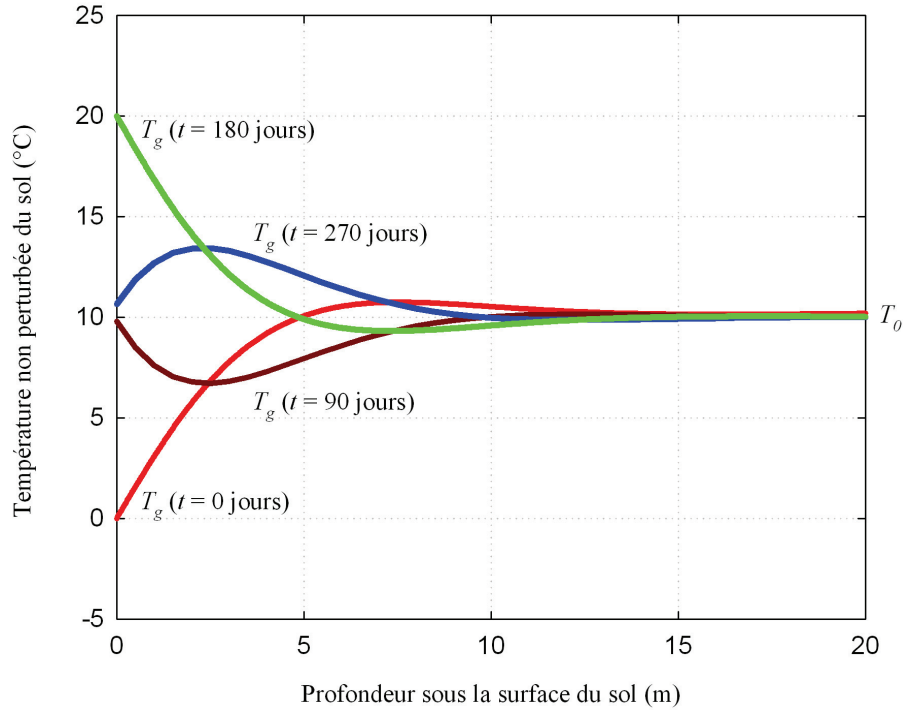


Figure 4.6: Exemple de l'évolution de la température non perturbée du sol en fonction de la profondeur et du jour de l'année (où le jour 0 correspond au 1^{er} janvier).

La température non perturbée moyenne du sol sur la longueur d'un puits est obtenue en intégrant l'Équation 4.9. La solution est donnée par:

$$T_{g, moy}(t) = T_0 + \left[\frac{g \cdot z^2}{2H} - \frac{T_1 \exp(-Az)}{2A \cdot H} \times (\sin(Az - B) + \cos(Az - B)) \right] \Bigg|_{z=D}^{z=D+H} \quad (4.10)$$

$$\text{où: } A = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_g t_c}} \text{ et } B = \frac{2\pi \cdot (t - n)}{t_c}$$

4.2.9 Étapes de calculs

Durant les étapes de calculs du Type272, le pas de temps de calcul utilisé est celui spécifié dans le studio TRNSYS, dt_{TRNSYS} . Les explications qui suivent sont présentées pour un réseau de puits sans la présence de nœuds supplémentaires dans le but d'alléger la description des étapes de calculs et d'en faciliter la compréhension. Avant d'aborder les différentes étapes de calculs, il est utile de définir certains termes reliés au temps :

- t est le temps écoulé depuis le début de la simulation; et
- t_i est le temps correspondant à l'application de la charge thermique au puits, q_i durant un pas de temps dt_{TRNSYS} . La valeur de i varie de 1 (premier pas de temps dt_{TRNSYS}) au nombre de pas de temps dt_{TRNSYS} écoulés depuis le début de la simulation (voir Figure 4.2).

4.2.9.1 Phase d'initialisation d'un projet ($t = 0$)

Les procédures suivantes ont lieu durant la phase d'initialisation d'un projet par le Type272:

- lecture des coordonnées des puits et calcul de la distance les séparant;
- calcul de la température non perturbée du sol pour chaque pas de temps dt_{TRNSYS} de l'ensemble de la simulation (voir section 4.2.8);
- calcul des valeurs de la fonction $I(r,t)$ (voir l'Équation 4.4 ou 4.5) pour $r = r_b$ et pour r égale à la distance entre chaque puits et ce, pour l'ensemble des temps compris dans l'intervalle de temps immédiat Δt_h et pour les temps t_d, t_w, t_m auxquels débutent les intervalles correspondants $\Delta t_d, \Delta t_w, \Delta t_m$ (voir Figure 4.3).

4.2.9.2 Phase de simulation d'un projet ($t > 0$)

Les procédures suivantes sont exécutées à chaque pas de temps dt_{TRNSYS} durant la phase de simulation d'un projet par le Type272:

- lecture des données d'entrées (température et débit du fluide à l'entrée du réseau de puits) du Type272. En principe, ces données peuvent varier à chaque pas de temps;

- s'il y a lieu, calcul des valeurs de la fonction $I(r, t_y)$ (c'est-à-dire lorsque t est différent de t_d, t_w, t_m et est supérieur à t_h) (voir l'Équation 4.4 ou 4.5 et la Figure 4.3) pour $r = r_b$ et pour r égal à la distance entre chaque puits;
- calcul de la variation de température à la paroi de chaque puits causée par l'effet des charges passées (valeurs déterminées lors des pas de temps précédents et mises en mémoire) entre chaque puits et le sol selon les Équations 4.6 et 4.8, $(\Delta T_b)_{dt_{TRANSYS}, \text{passés}}$;
- début du processus itératif permettant de déterminer les charges thermiques entre chaque puits et le sol pour le pas de temps actuel, q_t ;

Processus itératif

1. on pose pour chaque puits, de façon arbitraire (afin de démarrer l'algorithme de convergence, présenté plus bas) : $q_t^* = q_{t-dt_{TRANSYS}}^*$ et $T_{f,out}^* = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ (l'astérisque sert à différencier différentes valeurs que peut prendre la même variable pour un puits dans l'algorithme de convergence) ;
2. calcul pour chaque puits de la variation de température à la paroi de chaque puits causée par l'ensemble des charges du pas de temps actuel q_t^* selon l'Équation 4.6, $(\Delta T_b)_{dt_{TRANSYS}, \text{actuel}}$ et addition de cette variation à la variation de température causée par les charges thermiques passées, calculée précédemment:

$$T_b = (\Delta T_b)_{dt_{TRANSYS}, \text{actuel}} + (\Delta T_b)_{dt_{TRANSYS}, \text{passés}} + T_g$$

3. calcul de la température moyenne du fluide dans chaque puits à l'aide de l'équation suivante, faisant intervenir la résistance thermique du puits, R_b :

$$T_{f, \text{moy}} = \frac{R_b \cdot q_t^*}{H} + T_b$$

4. calcul de la température du fluide à la sortie de chaque puits:

$$T_{f,out}^{**} = (2T_{f,moy}) - T_{f,in}^{*}$$

où $T_{f,in}^{*}$ est connue pour le premier puits de chaque branche du réseau (à l'entrée de l'échangeur géothermique) et est la température de sortie du puits précédent pour les autres puits.

5. si $|T_{f,out}^{**} - T_{f,out}^{*}| \geq 10^{-6}$ pour au moins un puits, alors poursuivre à l'étape no.2, sinon la convergence est atteinte sur la valeur finale de $T_{f,out}$ et la simulation peut progresser d'un pas de temps après avoir mis en mémoire les charges entre les puits et le sol obtenues au pas de temps actuel;

6. on pose pour chaque puits: $T_{f,in}^{*}$ égale à la valeur $T_{f,out}^{**}$ du puits précédent (sauf pour le premier puits de chaque branche du réseau);

7. calcul pour chaque puits de q_t^{**} selon:

$$q_t^{**} = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} (T_{f,in}^{*} - T_{f,out}^{**})$$

8. calcul pour chaque puits de q_t^{***} selon:

$$q_t^{***} = q_t^{*} + f \cdot (q_t^{**} - q_t^{*})$$

où f est un facteur de convergence posé à 0.005

9. on pose pour chaque puits:

$$T_{f,out}^{*} = T_{f,out}^{**} \text{ et } q_t^{*} = q_t^{***}$$

10. retour à l'étape no.2.

4.3 Résumé

Le modèle proposé est développé pour une utilisation dans l'environnement TRNSYS sous l'appellation "Type272". Contrairement au modèle DST, le modèle proposé permet le positionnement exact des puits par l'utilisateur. Le transfert de chaleur entre le fluide et la paroi d'un puits est réalisé par l'utilisation d'une résistance thermique du puits dont la valeur doit être spécifiée par l'utilisateur. Le calcul du transfert de chaleur entre le sol et la paroi d'un puits est réalisé par la méthode de la source linéique finie modifiée pour l'obtention de la température moyenne du sol sur la longueur d'un puits. Les méthodes de superposition spatiale et temporelle sont utilisées afin de tenir compte de la présence de plusieurs puits et de l'effet des charges thermiques passées entre les puits et le sol. Finalement, le modèle proposé permet de tenir compte de deux réseaux indépendants de tubes en U, contrairement à un seul pour le modèle DST, ayant chacun sa propre température du fluide à l'entrée et son propre débit.

CHAPITRE 5 VALIDATION DU MODÈLE PROPOSÉ

5.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la validation du modèle proposé (Type272). Cette validation est effectuée par comparaison avec les résultats de sept cas expérimentaux et d'une comparaison interlogicielle avec le modèle DST. Trois cas sont présentés dans ce chapitre (cas no.1 à 3) et quatre cas sont présentés à l'Annexe 7 (cas no.4 à 7). La comparaison interlogicielle est également présentée dans ce chapitre, à la suite des trois cas expérimentaux. Parmi les sept cas expérimentaux, six cas sont des essais de réponse thermique et un cas concerne un système d'échangeur géothermique réel en opération pour lequel des données ont été enregistrées sur une période de 16 mois.

Cinq des six essais de réponse thermique ont été réalisés par injection constante de chaleur dans un puits, l'autre essai de réponse thermique (cas no.2) a été réalisé par injection de chaleur variable (par paliers) dans un puits. Les données du système d'échangeur géothermique réel concernent à la fois des périodes d'injection et d'extraction de chaleur.

Pour l'ensemble des cas concernant des essais de réponse thermique, sauf le cas no.2, la procédure décrite à la section 2.1.1 a été utilisée pour calculer la valeur de la conductivité thermique effective du sol, λ_g et la résistance thermique du puits, R_b . Il est à noter que λ_g effective et R_b sont calculées avec les données expérimentales prises en compte à partir d'un temps correspondant au critère $\alpha_g t / r_b^2 \geq 20$, tel qu'indiqué à la section 2.2.1. Dans tous les cas, la tête des puits est supposée au ras du sol et la température non perturbée du sol est supposée constante dans le temps et en profondeur. Lorsque les sources d'informations utilisées pour les données d'essai de réponse thermique ne présentaient que des résultats graphiques de l'évolution de la température du fluide à l'entrée, $T_{f,in}$ et à la sortie, $T_{f,out}$ du ou des tubes en U dans le puits, les courbes graphiques ont été numérisées pour permettre la comparaison des résultats avec le Type272. Pour ces cas, seule une comparaison graphique est présentée.

Lorsque les sources d'informations présentaient également des résultats numériques (cas no.1 à 3 et 5), ceux-ci ont été privilégiés pour la reconstruction des courbes graphiques illustrant les

données expérimentales. Pour ces cas, une comparaison graphique ainsi que numérique est présentée selon les données disponibles

Pour l'ensemble des essais de réponse thermique, sauf le cas no.2, les données utilisées par le modèle proposé pour la simulation des essais sont le débit du fluide circulant dans le puits géothermique et la puissance de chauffage. Pour le cas no.2, les données utilisées par le modèle proposé sont le débit du fluide circulant dans le puits géothermique et la température d'entrée du fluide dans le puits.

De façon générale, l'écart entre les valeurs mesurées et les résultats du modèle proposé est plus grand lorsqu'on utilise la puissance de chauffage plutôt que la température du fluide à l'entrée du puits comme données d'entrée. L'utilisation de la puissance de chauffage comme données d'entrée (indirecte) implique une étape itérative supplémentaire de calcul durant laquelle le programme TRNSYS doit déterminer la température du fluide à l'entrée du système de puits géothermique, soit une donnée d'entrée directe du Type272. Cette étape itérative supplémentaire sur la valeur de la température du fluide à l'entrée du système géothermique implique une certaine erreur qui se répercute dans les calculs de la température du fluide à la sortie du puits, et ainsi de suite.

Dans l'objectif de simplifier le processus de validation et d'éviter une analyse exagérée et passablement spéculative des données disponibles pour les cas étudiés, la masse volumique du fluide est posée égale à $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ dans tous les cas et la chaleur spécifique du fluide est calculée de manière à ce que la puissance de chauffage moyenne spécifiée dans la source d'information du cas étudié soit représentative de l'écart de température du fluide entre l'entrée et la sortie du puits présenté dans le cas en question. Cette façon de faire a été établie à la suite de l'observation que dans la plupart des cas, la puissance spécifiée dans les sources d'informations des cas expérimentaux ne concordait pas correctement avec l'écart de température du fluide entre l'entrée et la sortie du système géothermique pour le débit et les propriétés thermiques de fluide spécifié, soit de l'eau dans la plupart des cas. Pour cette raison, la chaleur spécifique du fluide utilisée lors des simulations varie entre $3\,900$ et $4\,850\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Chaque cas est accompagné d'un tableau indiquant une synthèse des données utilisées pour valider les résultats du modèle proposé. Trois types de commentaires accompagnent les données présentées:

- *Valeur tirée telle quelle du cas no.i* indique que la valeur de ce paramètre est spécifiée explicitement, sous forme numérique, dans la source d'information;
- *Valeur calculée* indique que la valeur de ce paramètre n'est pas donnée explicitement dans la source d'information et a été calculée à partir des données présentes (graphiques ou numériques) dans la source d'information; et
- *Valeur estimée* indique que la valeur de ce paramètre n'est pas donnée explicitement dans la source d'information et a été estimée à partir des données présentes dans la source d'information.

L'écart RMS (*root mean square*) est utilisé pour quantifier l'écart entre les données expérimentales et les résultats du modèle proposé. L'écart RMS est une mesure statistique de la variation d'une grandeur, donnée par:

$$\varepsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N}}$$

où ε_i est l'écart entre la valeur expérimentale et la valeur calculée.

Bernier et al. (2007) montrent qu'un écart constant à la hausse de 2 °C sur la température du fluide à la sortie d'un échangeur géothermique modifiait de moins de 6.5 % la valeur de l'énergie consommée annuellement par une pompe à chaleur typique opérant soit en chauffage uniquement, en climatisation uniquement, ou les deux. Bien que les auteurs n'indiquent pas l'effet d'un écart constant à la baisse de 2 °C, cet effet peut être calculé à l'aide des données présentes dans l'article. Cet effet est de moins de 5.8 % sur la valeur de l'énergie consommée par la pompe à chaleur. Ainsi, un écart RMS de 2 °C est choisi comme référence pour déterminer l'écart maximal acceptable entre les données expérimentales et les résultats du modèle proposé.

5.2 Cas no.1 – Essai de réponse thermique à charge constante – 1 puits

Le cas no.1 est le cas *Site A #2 on 1-9-97* tiré de Austin (1998).

Tableau 5.1: Synthèse des données utilisées pour valider les résultats du Type272.

Paramètre	Valeur	Unité
Longueur du puits*	77	m
Rayon du puits*	0.045	m
Température non perturbée du sol*	17.28	°C
Diffusivité thermique du sol***	$1.00 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Débit moyen du fluide*	0.189	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Chaleur spécifique du fluide (eau)***	3 900	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Puissance moyenne de chauffage**	2 458	W
Conductivité thermique effective**	2.73	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Résistance thermique du puits**	0.131	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

*Valeur tirée telle quelle de du cas no.1, **Valeur calculée, ***Valeur estimée

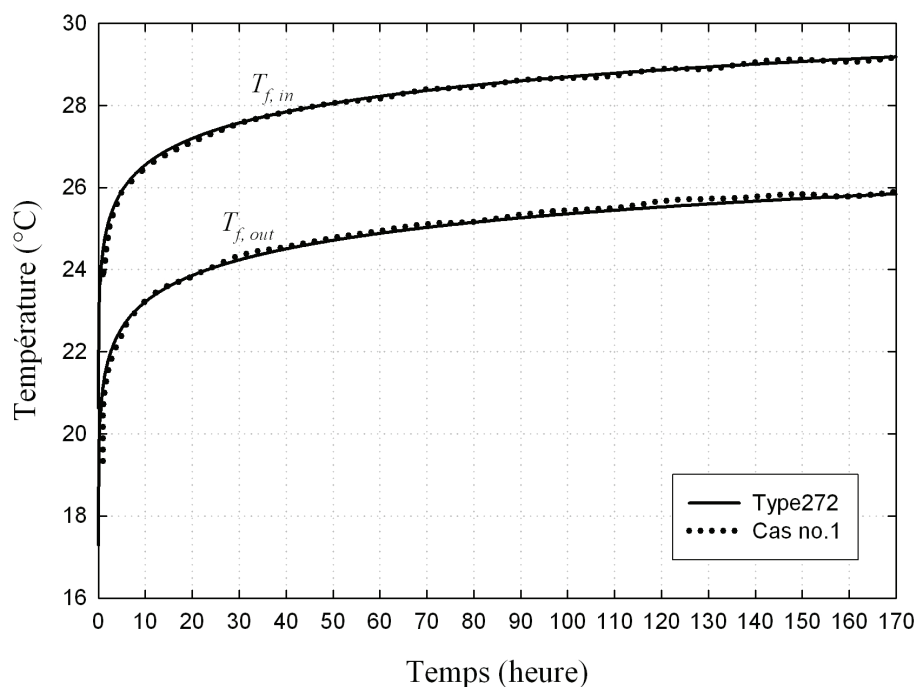


Figure 5.1: Température du fluide pour le cas no.1 et selon le Type272.

Tableau 5.2: Écarts calculés à partir de données numériques tirées du cas no.1 et les résultats du Type272 (Type272 - cas no.1).

Temps	Écart sur $T_{f,in}$	Écart sur $T_{f,out}$
heures	°C	°C
1	0,56	0,51
10	0,05	-0,01
20	0,08	0,02
30	0,01	-0,10
40	0,00	-0,05
50	-0,01	-0,07
60	0,05	-0,07
70	-0,03	-0,09
80	0,04	-0,02
90	-0,02	-0,08
100	0,02	-0,09
110	0,05	-0,06
120	-0,03	-0,15
130	0,04	-0,13
140	-0,06	-0,12
150	-0,05	-0,11
160	0,07	0,01

La Figure 5.1 et les données présentées au Tableau 5.2 montrent une excellente concordance entre les données expérimentales et les résultats du Type272. Suivant les écarts donnés au Tableau 5.2, l'écart RMS sur $T_{f,in}$ est de 0.143 °C et est de 0.147 °C sur $T_{f,out}$. Ces écarts sont en dessous de la limite fixée sur l'écart RMS de 2 °C et le modèle proposé représente adéquatement l'évolution de la température du fluide à l'entrée et à la sortie du puits pour ce cas.

5.3 Cas no.2 – Essai de réponse thermique à charge variable – 1 puits

Le cas no.2 est le test de réponse thermique effectué en 2008 par Golder Associés Ltée (Golder) pour Tricentris - Centre de Tri (Tricentris) situé à Terrebonne (Québec), Canada. Des données expérimentales sur une période de six jours et à intervalles de 10 minutes ont été obtenues et sont utilisées ici en accord avec les entreprises concernées.

L'essai de réponse thermique a été réalisé par paliers, c'est-à-dire par l'application successive dans le temps d'une série de puissances constantes. Pour cet essai, les données de températures à l'entrée et à la sortie du puits présentent trop de variation pour déterminer de manière précise les valeurs de λ_g effective et de R_b , tel que présenté à la section 2.1.1. Pour cette raison, ces valeurs ont été déterminées par essais et erreurs en utilisant une gamme de valeurs possibles de manière à minimiser l'écart entre les données expérimentales et les résultats du modèle proposé. La valeur de λ_g effective déterminée par Golder est utilisée pour le modèle proposé, mais pas la valeur de R_b puisque Golder utilise les modèles de la source cylindrique et de la ligne source infinie. La valeur de R_b a donc été déterminée pour le modèle proposé selon le modèle de la ligne source finie. Pour ce cas, les données d'entrées au Type272 sont la température du fluide à l'entrée du puits et le débit du fluide circulant dans le puits. La température du fluide à la sortie du puits calculée par le Type272 est comparée aux données expérimentales.

Tableau 5.3: Synthèse des données utilisées pour valider les résultats du Type272.

Paramètre	Valeur	Unité
Longueur du puits*	182	m
Rayon du puits*	0.08	m
Température non perturbée du sol*	8.65	°C
Diffusivité thermique du sol*	$9.00 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Débit moyen du fluide*	0.272	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Chaleur spécifique du fluide (eau)*	4 200	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Puissance moyenne de chauffage, 1 ^{er} palier*	3 062	W
Puissance moyenne de chauffage, 2 ^{ème} palier*	7 156	W
Puissance moyenne de chauffage, 3 ^{ème} palier*	10 987	W
Conductivité thermique effective*	2.25	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Résistance thermique du puits (essais-erreur FLS)**	0.115	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

*Valeur tirée telle quelle du cas no.2, **Valeur calculée, ***Valeur estimée

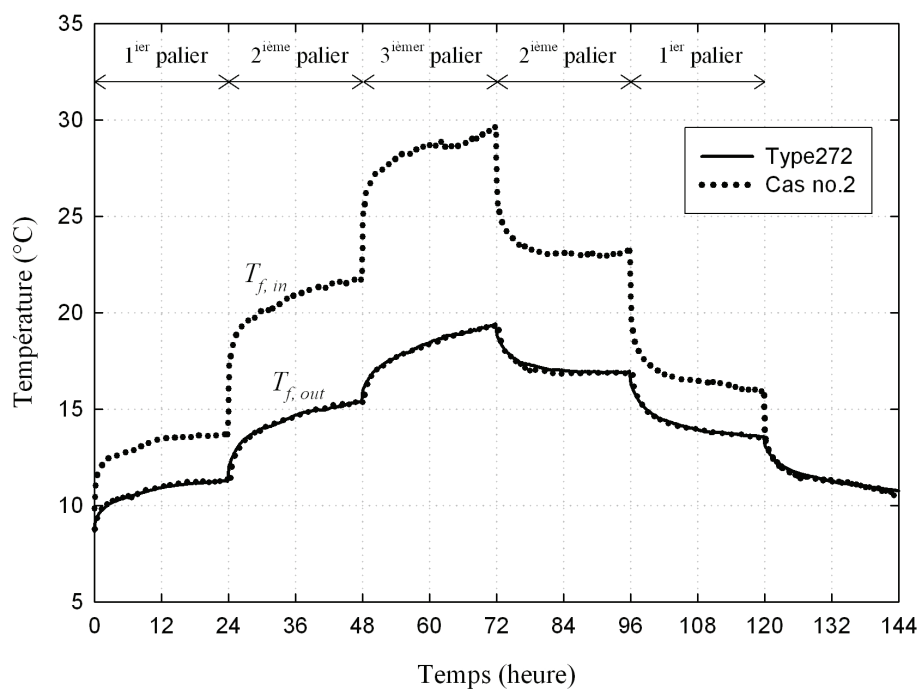


Figure 5.2: Température du fluide pour le cas no.2 et selon le Type272.

Il est à noter qu'à la fin du 3^{ième} palier, à la Figure 5.2, la température du fluide à l'entrée du puits subit une variation brusque. Deux causes principales sont généralement à la source de ce genre d'évènement: une variation de la tension du réseau électrique alimentant l'essai de réponse thermique ou une variation de la température extérieure. Afin de remédier à ce comportement indésirable lors d'un essai de réponse thermique, il est suggéré de munir l'essai d'un régulateur de tension et de bien isoler (conduction/convection/rayonnement) les conduites en dehors du puits.

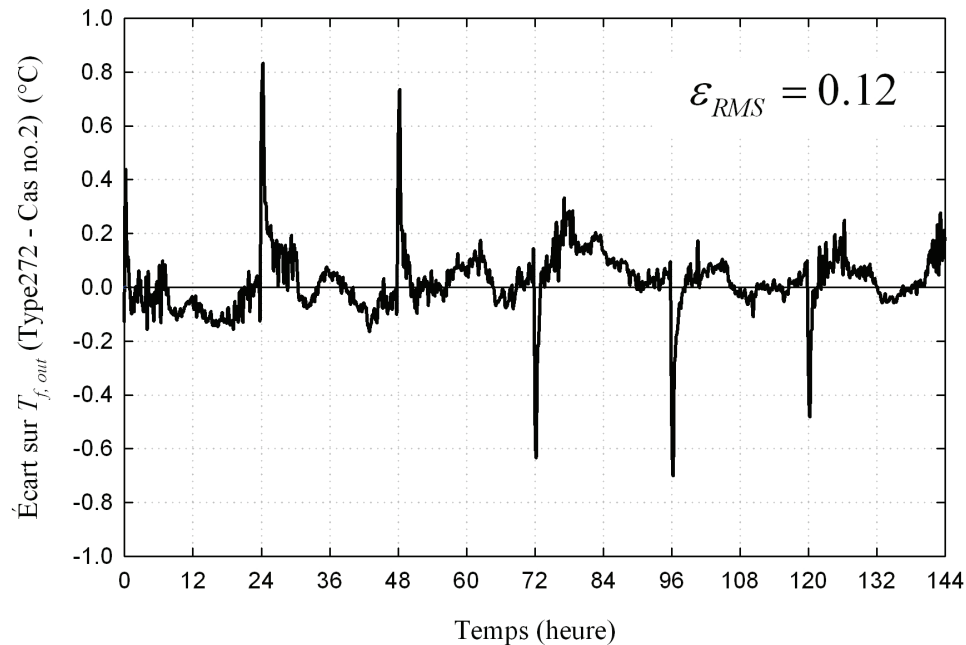


Figure 5.3: Écart de la température du fluide à la sortie du puits entre les résultats du Type272 et les données du cas no.2.

Suivant les résultats illustrés aux Figures 5.2 et 5.3, le modèle proposé représente adéquatement l'évolution de la température du fluide durant cet essai. Les plus grands écarts entre les résultats du modèle proposé et les données expérimentales ont toujours lieu durant l'heure suivant un changement de palier, soit lors d'une variation importante de la puissance injectée dans le puits. Cet écart est probablement lié au fait que le Type272, tout comme le modèle DST, ne prend pas en compte la capacité thermique du puits. L'écart sur la température du fluide à la sortie du puits est inférieur à la limite fixée sur l'écart RMS de 2 °C et le modèle proposé représente adéquatement l'évolution de la température du fluide à la sortie du puits pour ce cas.

5.4 Cas no.3 – Système en opération – 3 puits

Le cas no.3 est le cas *Oklahoma State University* tiré de Spitler et al. (2009).

Le cas no.3 n'est pas un essai de réponse thermique, mais le suivi sur une période de 16 mois débutant le 1^{er} mars 2005, du comportement d'un système d'échangeur géothermique réel couplé à des pompes à chaleur. Le système est composé de trois puits alimentés en parallèle (le débit total est posé comme étant également réparti entre les trois puits) et alignés selon un espacement de 6.1 mètres. Le système étudié opère en chauffage et en climatisation avec des charges variables de l'ordre d'environ -2 100 à 5 700 W.

Tableau 5.4: Synthèse des données utilisées pour valider les résultats du Type272.

Paramètre	Valeur	Unité
Nombre de puits*	3	(-)
Longueur moyenne des puits*	75	m
Rayon moyen des puits*	0.057	m
Espacement des puits*	6.1	m
Température non perturbée du sol*	17.3	°C
Diffusivité thermique du sol**	$1.27 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Débit total du fluide caloporteur*	0.631	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Chaleur spécifique du fluide***	4 180	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Conductivité thermique effective*	2.55	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Résistance thermique du puits*	0.1622	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

*Valeur tirée telle quelle de du cas no.3, **Valeur calculée, ***Valeur estimée

La Figure 4.5 montre l'évolution de la température du fluide à la sortie du groupe de trois puits pour la journée du 8 septembre 2005 selon deux approches applicables au Type272. La première approche consiste à utiliser la température du fluide à l'entrée du groupe de trois puits tirée des données expérimentales, $T_{f,in}$ comme donnée d'entrée directe au Type272 (Type272 selon T). La deuxième approche utilise le taux de transfert de chaleur entre les trois puits et le sol tiré des données expérimentales, q comme donnée d'entrée indirecte (demande un processus de calcul supplémentaire dans TRNSYS) du groupe de trois puits au Type272 (Type272 selon q). Les résultats indiquent des écarts RMS de 0.44 °C et 1.08 °C lorsque $T_{f,in}$ et q sont utilisés comme

données d'entrées, respectivement. Ces écarts sont en dessous de la limite fixée sur l'écart RMS de 2 °C et le modèle proposé représente adéquatement l'évolution de la température du fluide à l'entrée et à la sortie du puits pour ce cas.

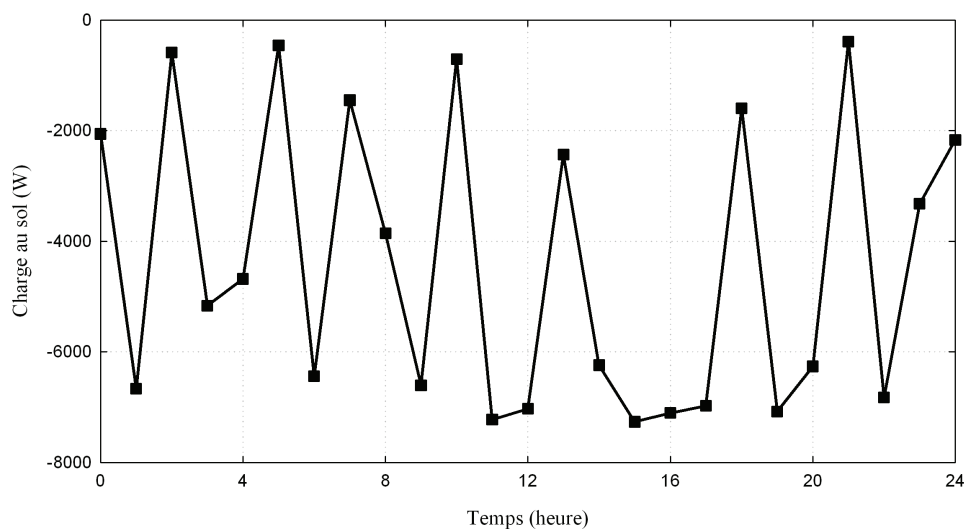


Figure 5.4: Charge horaire (climatisation) à l'échangeur géothermique pour la journée du 8 septembre 2005.

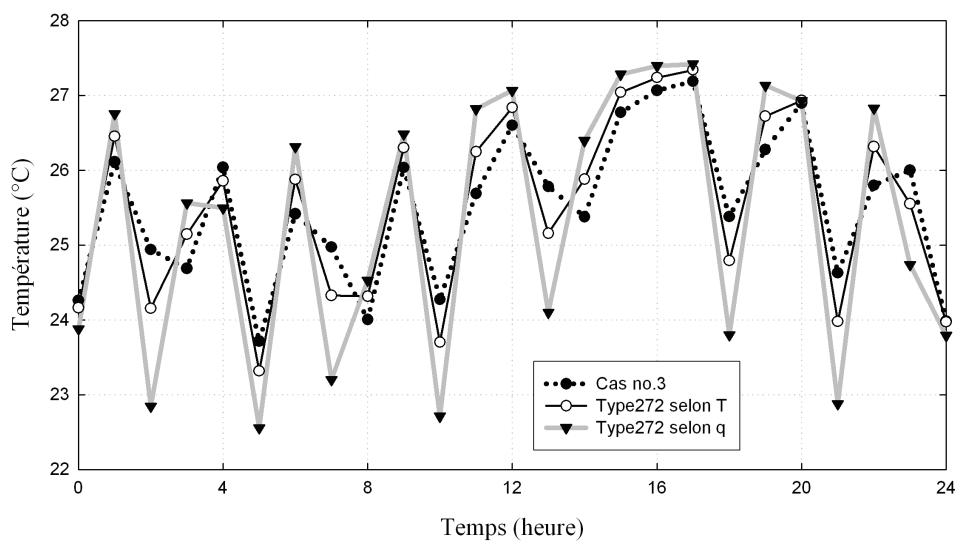


Figure 5.5: Température horaire du fluide à la sortie du groupe des trois puits pour la journée du 8 septembre 2005.

Une analyse plus fine des résultats (non présentés ici) montre que la température du fluide à la sortie du puits du centre diffère de la température de sortie des deux autres puits. Ainsi, en utilisant l'approche "Type272 selon q ", le puits du centre à une température supérieure de $0.035\text{ }^{\circ}\text{C}$, sur l'ensemble des 24 heures. Selon l'approche "Type272 selon T ", le même écart est de $0.037\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La Figure 5.6 montre l'évolution de la température moyenne mensuelle du fluide à la sortie du groupe des trois puits entre le mois de mars 2005 (mois = 3) et le mois de juin 2006 (mois = 18). Les résultats indiquent un écart RMS de $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ lorsque $T_{f,in}$ est utilisée comme donnée d'entrée et un écart RMS de $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ lorsque la puissance est utilisée comme donnée d'entrée. Il y a donc un excellent accord entre les données expérimentales et les résultats issus du Type272.

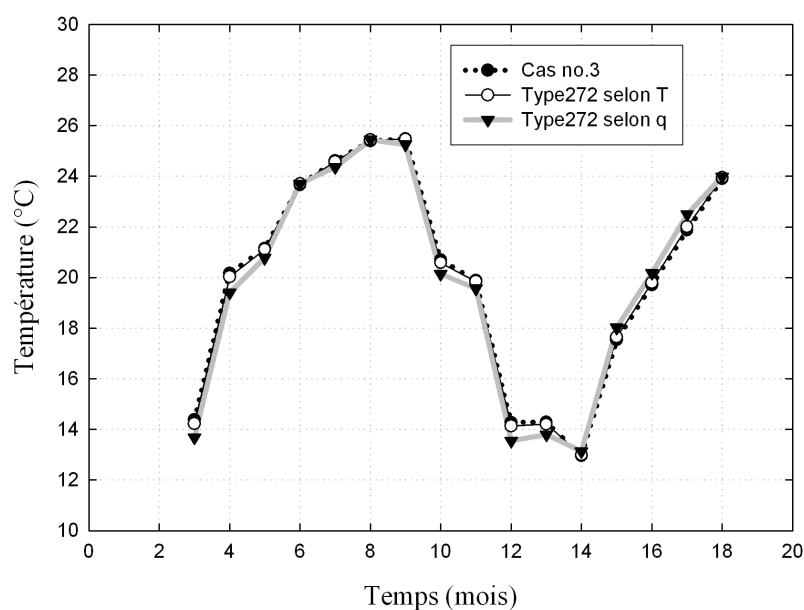


Figure 5.6: Température moyenne mensuelle du fluide à la sortie du groupe des trois puits sur une période de 16 mois.

L'analyse des résultats horaires du modèle proposé sur la période de 16 mois (non présentés ici) indique un écart RMS de $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ lorsque $T_{f,in}$ est utilisée comme donnée d'entrée et de $1.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lorsque q est utilisée comme donnée d'entrée. Encore une fois, l'accord entre le Type272 et les résultats expérimentaux est excellent.

Tableau 5.5: Caractéristiques de l'échangeur géothermique présenté à la Figure 5.7.

Paramètre	Valeur	Unité
Sol		
Volume de stockage (DST seulement)	15 424	m ³
Nombre de régions radiales (DST seulement)	1*	(-)
Nombre de régions verticales (DST seulement)	10	(-)
Conductivité thermique	2.0	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Diffusivité thermique	10 ⁻⁶	m ² ·s ⁻¹
Température non perturbée du sol	10	°C
Puits		
Nombre total	19	(-)
Nombre de branches de puits en série	19	(-)
Nombre de puits en série par branche	1	(-)
Espacement	2.5	m
Longueur	150	m
Profondeur des têtes de puits	0	m
Diamètre	0.10	m
Profondeur de la tête de puits sous la surface	0	m
Conductivité thermique du coulis (DST seulement)	2.0	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Résistance du puits, R_b	0.102	m·K·W ⁻¹
Tube en U		
Nombre par puits	1	(-)
Rayon extérieur d'un tuyau (DST seulement)	0.01664	m
Rayon intérieur d'un tuyau (DST seulement)	0.01372	m
Distance centre à centre entre les tuyaux (DST seulement)	0.0508	m
Conductivité thermique (DST seulement)	0.40	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Fluide		
Débit total à l'entrée du volume de stockage	19 000	kg·hr ⁻¹
Débit par puits	1 000	kg·hr ⁻¹
Masse volumique	1 000	kg·m ⁻³
Chaleur spécifique	4 190	J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹

*Maximum permis selon le nombre de puits en série par branches parallèles (DST seulement)

Le volume de stockage utilisé par le modèle DST est calculé selon l'Équation 3.2:

$$V_{BTES} = \pi \cdot r_1^2 \cdot H \cdot NBH_{tot} = \pi \cdot (0.525 \cdot 2.5)^2 \cdot 150 \cdot 19$$

$$V_{BTES} = 15\,424 \text{ m}^3$$

Il est utile de rappeler que r_1 est le rayon des maillages *Local* associés à chaque *Subregion* dont la valeur pour ce cas est de $0.525 \cdot B = 0.525 \cdot 2.5 = 1.3125$ mètre, selon l'hypothèse que le modèle DST modélise des champs de puits de configuration hexagonale. Le volume de stockage modélisé par le modèle DST est présenté à la Figure 5.8. Le volume de stockage est modélisé par 10 *Subregion* (1 radiale x 10 verticales). Il ne peut y avoir plus d'une région radiale dans le volume de stockage puisque tous les puits sont alimentés en parallèle. Ainsi, selon le modèle DST, chaque puits agit de manière *Local* dans un rayon de 1.3125 mètre, mais la température du fluide à l'intérieur des 19 puits est la même pour tous les puits sur toute leur longueur.

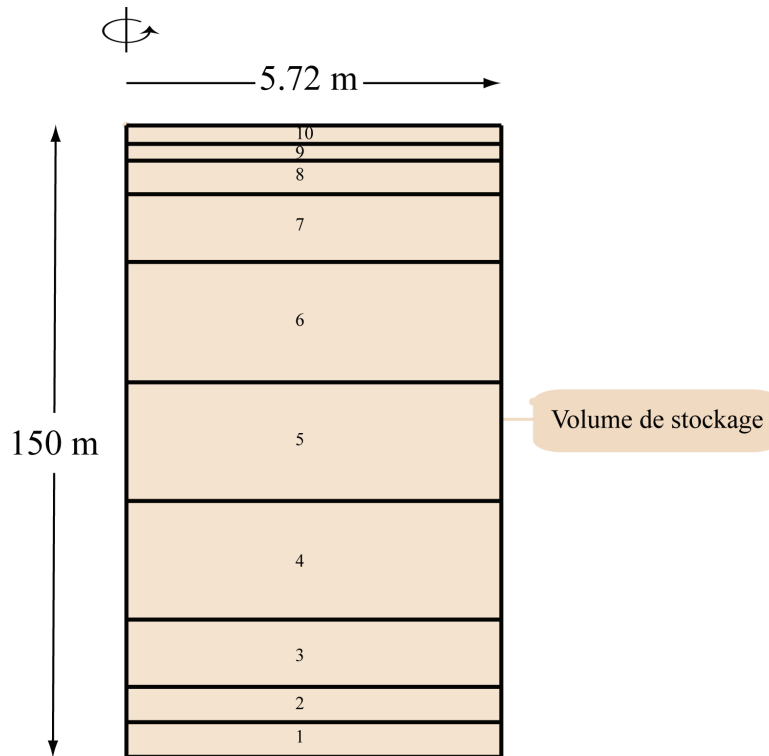


Figure 5.8: Une région radiale et dix régions verticales formant un maillage *Subregion* à dix *Subregion*.

L'épaisseur, selon z , et la longueur de puits par *Subregion*, L_{Sub_k} est donnée au Tableau 5.6. La longueur L_{Sub_k} égale à l'épaisseur, selon z , de la *Subregion* k multipliée par le nombre de puits attribués à la région radiale, soit 19 puits dans ce cas.

Tableau 5.6: Longueur de puits associée à chaque Subregion.

<i>Subregion</i> k	bornes verticales (m)	L_{Sub_k} (m)
1	0.00 à 4.07	77.39
2	4.07 à 8.15	77.39
3	8.15 à 16.29	154.77
4	16.29 à 32.58	309.54
5	32.58 à 60.86	537.27
6	60.86 à 89.14	537.27
7	89.14 à 117.42	537.27
8	117.42 à 133.71	309.54
9	133.71 à 141.85	154.77
10	141.85 à 150.00	154.77
Total		2 850 (19 puits · 150 m)

Il est à noter que la valeur de la résistance thermique du puits ($0.102 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$, au Tableau 5.5) calculée par le modèle DST est également appliquée au modèle proposé.

Le champ de puits est alimenté par un fluide dont la température varie selon un profil sinusoïdal annuel reflétant des périodes de recharge thermique liées à un ensoleillement plus intense (été) et des périodes marquées par le chauffage des bâtiments (hiver). La température du fluide à l'entrée du volume de stockage est ainsi donnée (en °C) par:

$$T_{f,in} = 30 + 30 \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{8760}\right) \quad (5.1)$$

où t est l'heure de la simulation TRNSYS. L'heure $t = 0$ correspond au 1^{er} janvier.

La Figure 5.9 illustre le profil annuel de la température du fluide à l'entrée du volume de stockage, selon l'Équation 5.1.

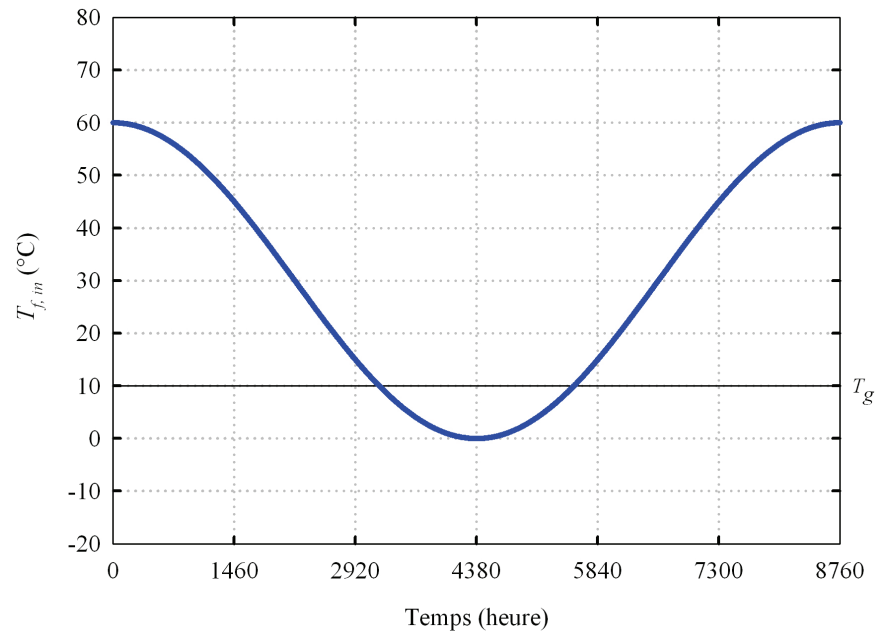


Figure 5.9: Profil annuel de la température du fluide à l'entrée du volume de stockage.

5.5.1 Résultats

La température du fluide à la sortie de cet échangeur géothermique, $T_{f,out}$ est présentée à la Figure 5.10, sur une période simulée de 20 ans. Pour le modèle proposé, cette température est la moyenne arithmétique de la température du fluide à la sortie des 19 puits. Pour les deux modèles, la variation annuelle de $T_{f,out}$ se stabilise dès la 2^{ième} année, avec des variations annuelles (à la hausse, mais diminuant d'année en année) en dessous de 1 % durant les années qui suivent.

La Figure 5.11 montre l'évolution de l'écart entre les résultats du modèle proposé et du modèle DST pour la température du fluide à la sortie de l'échangeur géothermique. L'écart présenté à la Figure 5.11 varie entre -3.14 et 3.40 °C (valeurs atteintes durant la 20^{ième} année), pour un écart absolu moyen de 1.84 °C sur une période de 20 ans. Cet écart peut être traduit ainsi: en période de pointe de recharge thermique, le modèle proposé transfère au sol jusqu'à 69 kW de plus que le

modèle DST et en période de pointe de chauffage des bâtiments, le modèle proposé transfère aux bâtiments jusqu'à 75 kW de plus que le modèle DST. L'écart entre les deux modèles sur le taux de transfert de chaleur transmis au sol, q_{sol} est présenté à la Figure 5.12 avec des valeurs positives lorsque le sol est chauffé par les puits géothermiques. L'écart absolu moyen sur q_{sol} est de 41 kW. L'écart absolu annuel moyen entre les résultats sur $T_{f,out}$ et sur q_{sol} varie de 95 % entre la 1^{ière} et la 2^{ième} année, de 1.0 % entre la 9^{ième} année et la 10^{ième} année et de 0.2 % entre la 19^{ième} et la 20^{ième} année de simulation.

La Figure 5.13 montre pour le modèle proposé, l'écart entre la température du fluide à la sortie du puits au centre du volume de stockage (puits no.1 à la Figure 5.7) et d'un puits en périphérie du volume de stockage (puits no.14 à la Figure 5.7). Tel que prévu, la température du fluide à la sortie du puits au centre du volume de stockage est toujours plus élevée que la température du fluide à la sortie d'un puits en périphérie (sauf durant le premier hiver). L'écart peut atteindre une valeur légèrement supérieure à 3 °C. Le modèle DST est incapable de donner une telle solution puisque selon ce modèle, tous les puits ont la même température du fluide à leur sortie pour la configuration étudiée ici. Compte tenu de cet écart dans les valeurs de températures individuelles des puits, il n'est pas surprenant de constater les différences observées à la Figure 5.10 entre le modèle proposé et le modèle DST.

Il est à noter que suivant l'observation de ces résultats, une simulation (non présentée ici) a été réalisée avec 100 régions verticales dans le modèle DST pour le même champ de puits, mais sans variation notable des résultats. L'écart absolu moyen sur $T_{f,out}$, entre le modèle DST à 100 et à 10 régions verticales est de 0.00 °C, avec un maximum isolé de 0.25 °C.

Il est à noter que les discontinuités engendrées par les méthodes de calculs du modèles DST (voir section 3.3.9.2) sont de l'ordre de 0.1 à 0.2 °C pour ce cas.

Il est à noter que la simulation a été effectuée sous le système d'exploitation *Windows XP 2002 Professionnel* avec un processeur *Intel Core 2 Duo 2.40 GHz* et une mémoire vive (RAM) de 1.96 Go. La durée de la simulation pour le modèle proposé est de 61 minutes et est de 4 minutes pour le modèle DST.

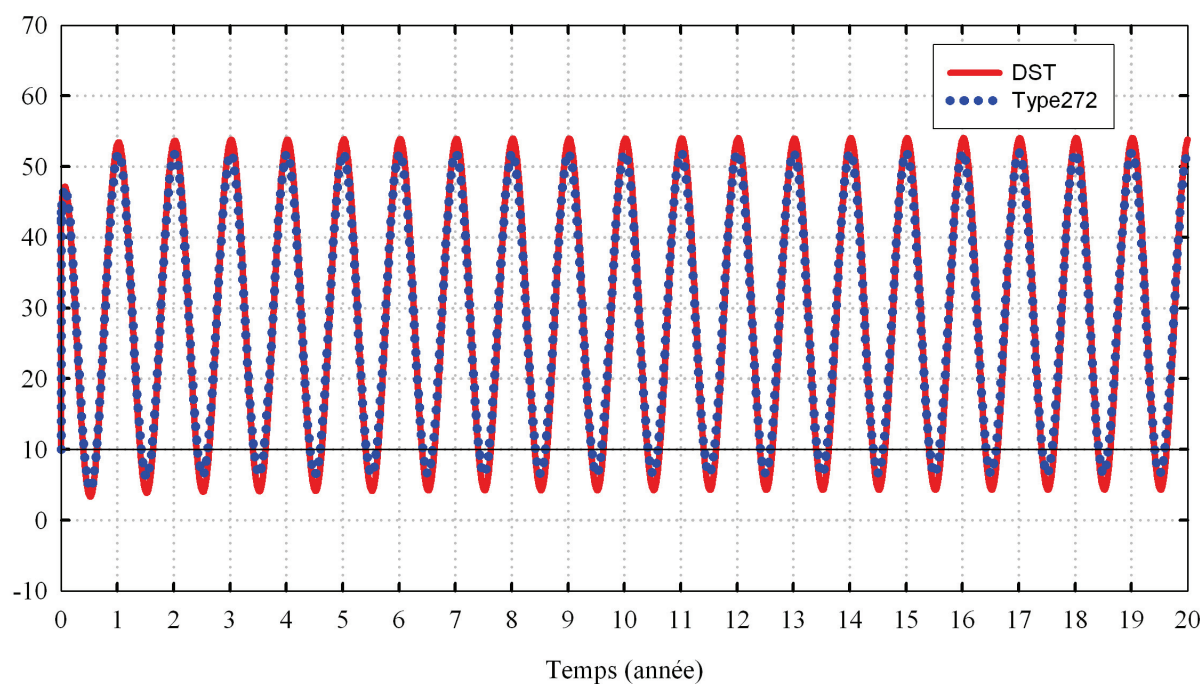


Figure 5.10: Température du fluide à la sortie de l'échangeur géothermique formé de 19 puits alimentés en parallèle, sur une période de 20 ans.

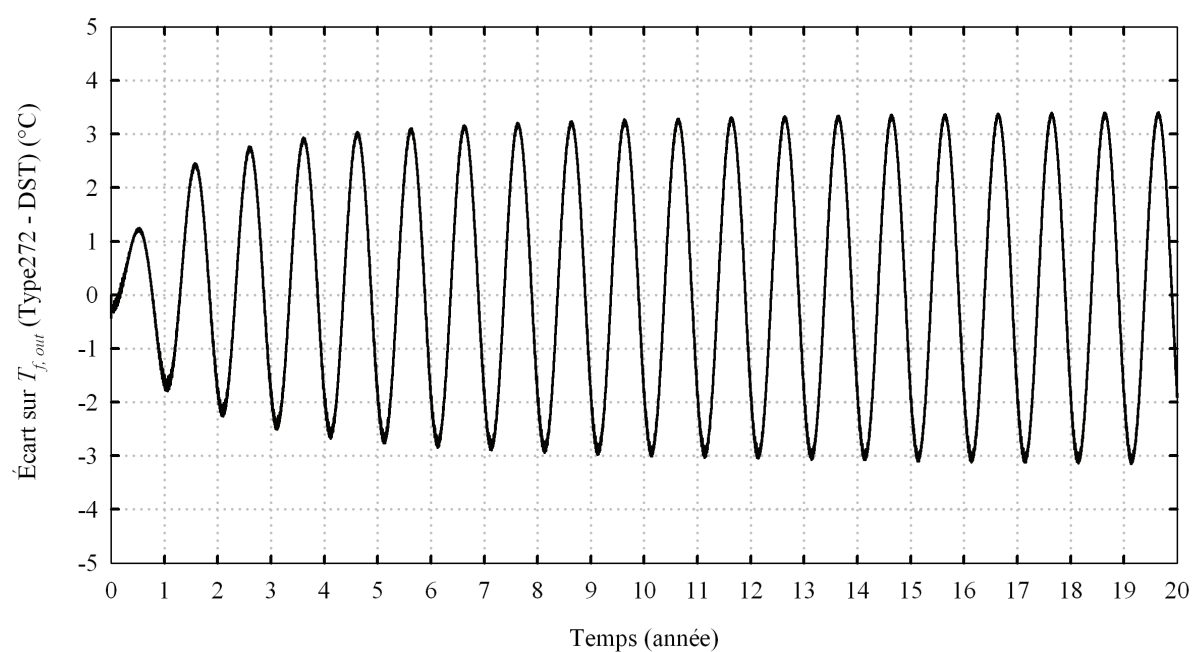


Figure 5.11: Écart de la température du fluide à la sortie du volume de stockage entre les résultats du Type272 et du modèle DST, sur une période de 20 ans.

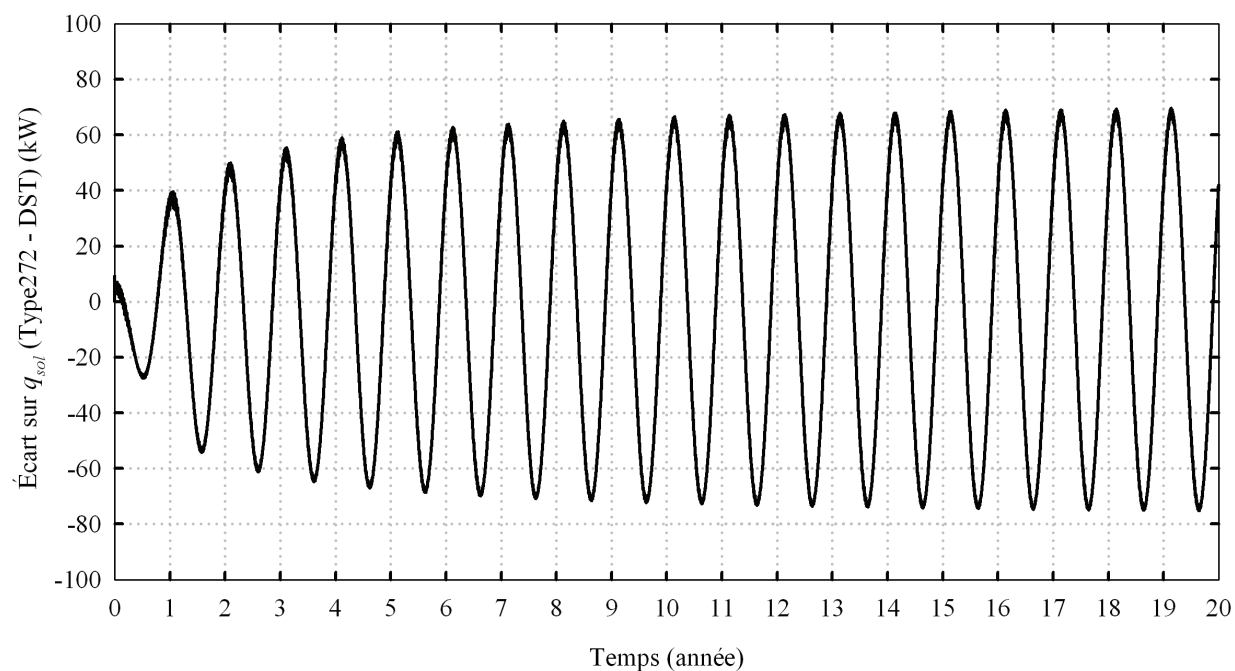


Figure 5.12: Écart sur le taux de transfert de chaleur transmis au sol (chauffage⁺ et refroidissement) entre les résultats du Type272 et du modèle DST, sur une période de 20 ans.

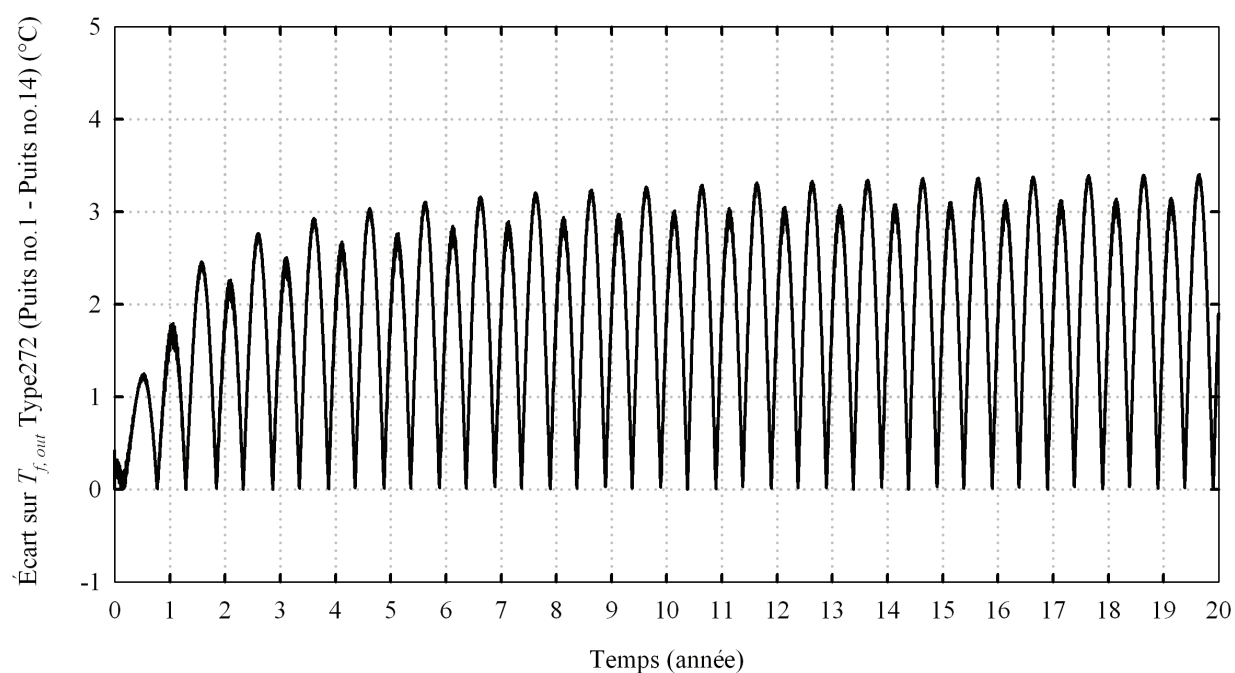


Figure 5.13: Écart entre la température du fluide à la sortie du puits no.1 et du puits no.14 pour le Type272, sur une période de 20 ans.

5.6 Résumé

Le modèle proposé est comparé à trois cas expérimentaux, soit un essai de réponse thermique à charge constante, un essai de réponse thermique à charge variable et un système de trois puits en opération. Le modèle proposé fait également l'objet d'une comparaison interlogicielle avec le modèle DST pour un champ de 19 puits distribués selon une configuration hexagonale et alimentés en parallèle. Dans tous les cas, la comparaison avec les résultats du modèle proposé se fait par la valeur de la température du fluide à l'entrée ou à la sortie de l'échangeur géothermique. Les plus grands écarts sont généralement observés lors de l'augmentation de la variation de la dérivée de la température du fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique par rapport au temps. La comparaison entre les résultats du modèle proposé et les données des cas expérimentaux présente des écarts RMS variant entre 0.12 °C et 1.20 °C. Suivant ces résultats, le modèle proposé représente adéquatement l'évolution de la température du fluide dans un échangeur géothermique.

La comparaison interlogicielle est réalisée sur une période simulée de 20 ans où la température du fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique est identique pour les deux modèles, variant annuellement de manière sinusoïdale entre 60 °C et 0 °C. L'écart absolu moyen sur la température du fluide à la sortie de l'échangeur géothermique est de 1.84 °C et atteint un maximum de 3.40 °C à la 20^{ième} année. La comparaison met en évidence certaines limitations du modèle DST, entre autres, par le type de configuration de champ de puits pouvant être raisonnablement modélisé et par l'impossibilité de calculer pour chaque puits, la température du fluide à sa sortie.

CHAPITRE 6 APPLICATIONS

6.1 Introduction

Trois applications utilisant soit le Type272 ou le modèle DST modifié sont présentées dans ce chapitre. Deux des applications concernent le stockage d'énergie solaire par puits géothermiques couplé à des pompes à chaleur alors que la troisième porte sur la modélisation d'un puits muni de 2 circuits indépendants.

6.2 Hypothèses

Les hypothèses suivantes sont retenues pour les deux applications de stockage d'énergie solaire :

- Les modèles d'échangeur géothermique (Type272 et DST modifié) ne considèrent que l'échange de chaleur par conduction; l'influence thermique des écoulements d'eau souterraine est négligée;
- l'énergie de pompage et les pertes thermiques dans les tuyaux reliant les différents éléments sont négligées; et
- le fluide circulant dans les tuyaux est additionné d'un antigel et a des propriétés similaires à celles de l'eau.

6.3 Application no.1 (projet Downsview)

Les résultats du projet Downsview présentés dans cette section sont issus d'un mandat sur un projet réel accordé au groupe du professeur Bernier (Bernier et Langlois, 2009a, Bernier et al., 2009b et Eslami-nejad et al., 2009). Ce projet a pour objectif la construction d'un échangeur géothermique permettant de satisfaire en partie les besoins en chauffage (excluant l'eau chaude) et en climatisation d'un bâtiment administratif (à bureaux) d'environ 2 400 m² et de trois serres adjacentes (chauffage seulement). Le projet Downsview est localisé dans la ville de Toronto (Ontario), Canada.

L'échangeur géothermique proposé est constitué de 25 puits également espacés de 8 mètres selon un arrangement rectangulaire (5 x 5), tel que présenté à la Figure 6.1. Les caractéristiques de l'échangeur géothermique sont présentées au Tableau 6.1. Les 25 puits formant l'échangeur géothermique sont divisés en deux groupes (configuration dite 9/16): un réseau de 16 puits situés

en périphérie et relié à deux pompes à chaleur de 100 kW (PAC-2 et PAC-3) et un autre réseau de 9 puits situés au centre et relié à une pompe à chaleur de 100 kW (PAC-1) et à un réseau de capteurs solaires, tel que présenté à la Figure 6.1. Tous les puits sont alimentés en parallèle dans chacun des deux réseaux indépendants.

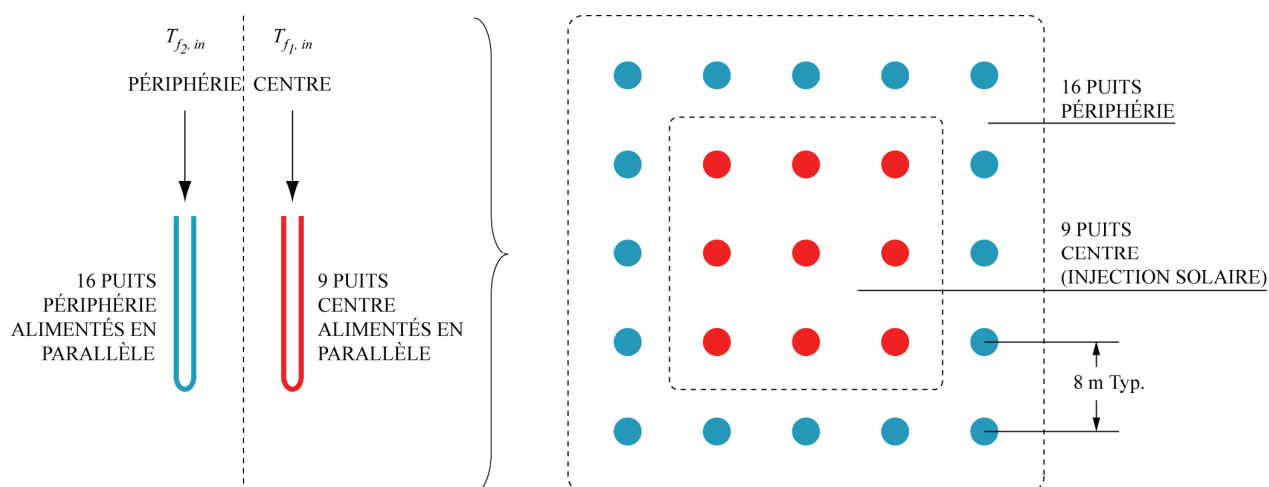


Figure 6.1: Alimentation des deux réseaux de puits indépendants (à gauche). Vue du dessus de la répartition des puits dans l'échangeur géothermique selon la configuration 9/16 (à droite).

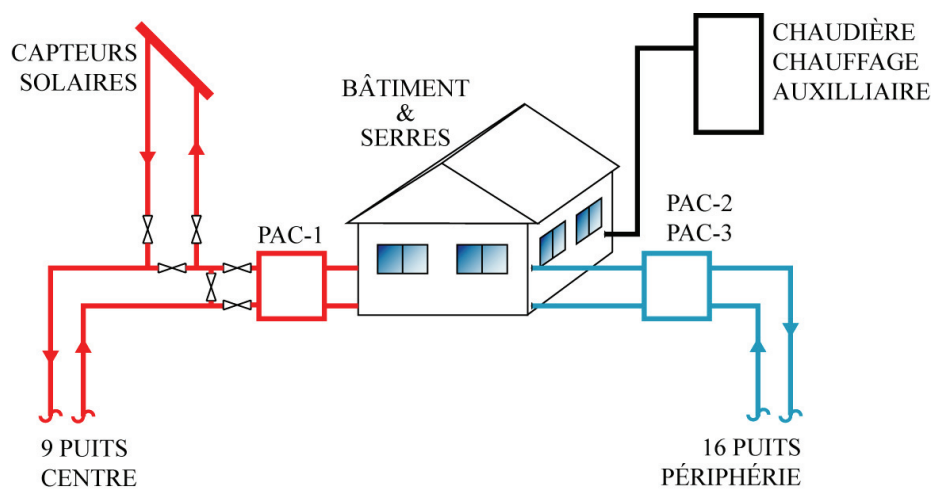


Figure 6.2: Représentation schématique du système de stockage d'énergie solaire par puits géothermique.

Tableau 6.1: Caractéristiques de l'échangeur géothermique.

Paramètre	Valeur	Unité
Sol		
Conductivité thermique	2.39*	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Diffusivité thermique	0.072*	$\text{m}^2\cdot\text{jour}^{-1}$
Température non perturbée du sol	10.8*	$^{\circ}\text{C}$
Puits		
Nombre total	25 (5 x 5)	(-)
Espacement	8.0	m
Longueur	146	m
Diamètre	0.10	m
Profondeur de la tête de puits sous la surface	1.00	m
Résistance du puits, R_b	0.10*	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
Débits par tube en U		
Réseau de 9 puits du centre	1 135	$\text{kg}\cdot\text{hr}^{-1}$
Réseau de 16 puits en périphérie	1 135	$\text{kg}\cdot\text{hr}^{-1}$

*GeoEnergy (2009)

6.3.1 Opération générale du système

Durant la saison de climatisation (de mai à septembre), le travail des 9 puits du centre consiste uniquement à servir de stockage solaire saisonnier. Ces puits sont alimentés par des capteurs solaires dont la surface totalise 200 m^2 . Les 16 puits en périphérie sont utilisés pour la climatisation du bâtiment administratif (les serres ne sont pas climatisées par l'échangeur géothermique).

Durant la saison de chauffage (d'octobre à avril), l'ensemble des puits sert au chauffage du bâtiment et des serres. L'énergie injectée dans le sol durant l'été par les 9 puits du centre permet de maintenir au-dessus de 0°C la température du fluide alimentant les PAC, T_{EWT} . La valeur de 0°C a été choisie par l'ingénieur du projet comme une contrainte de conception suffisamment sécuritaire. Il est à noter que le modèle de PAC sélectionné peut fonctionner jusqu'à une T_{EWT} de -6.7°C .

6.3.2 Programme de simulation et modélisation de l'échangeur géothermique

L'ensemble du système proposé est simulé avec le programme TRNSYS en exploitant le Type272. Suivant la configuration 9/16 des puits, le modèle d'échangeur géothermique utilisé doit tenir compte de deux réseaux de puits ayant des conditions d'entrée différentes (température et débit). Le modèle doit également tenir compte de l'emplacement précis (coordonnées) des puits afin de calculer l'interaction thermique entre ceux-ci. Le Type272 permet de satisfaire ces contraintes contrairement au modèle DST, il a donc été choisi pour effectuer la simulation de l'échangeur géothermique.

6.3.3 Séquence de contrôle durant l'opération du système

L'organigramme illustrant les séquences de contrôle implantées dans TRNSYS est présenté à la Figure 6.3. Durant la saison de chauffage, deux facteurs principaux contrôlent la séquence d'opérations du système, soit la température du fluide à l'entrée de la PAC-1 ($T_{EWT,PAC-1}$) et la charge de chauffage à satisfaire. La PAC-1 est placée en première ligne et est activée tant que la température du fluide à son entrée est supérieure à 0 °C (avec une bande morte de 2 °C sur la régulation). Lorsque $T_{EWT,PAC-1} < 0$ °C, la PAC-1 est désactivée et les PAC-2 et 3 sont activées (il est à noter que les 9 puits du centre peuvent continuer à transférer l'énergie solaire au sol sans passer par la PAC-1). Les PAC-2 et 3 (et éventuellement le système de chaudières auxiliaires) sont également activées lorsque la capacité de chauffage de la PAC-1 est atteinte

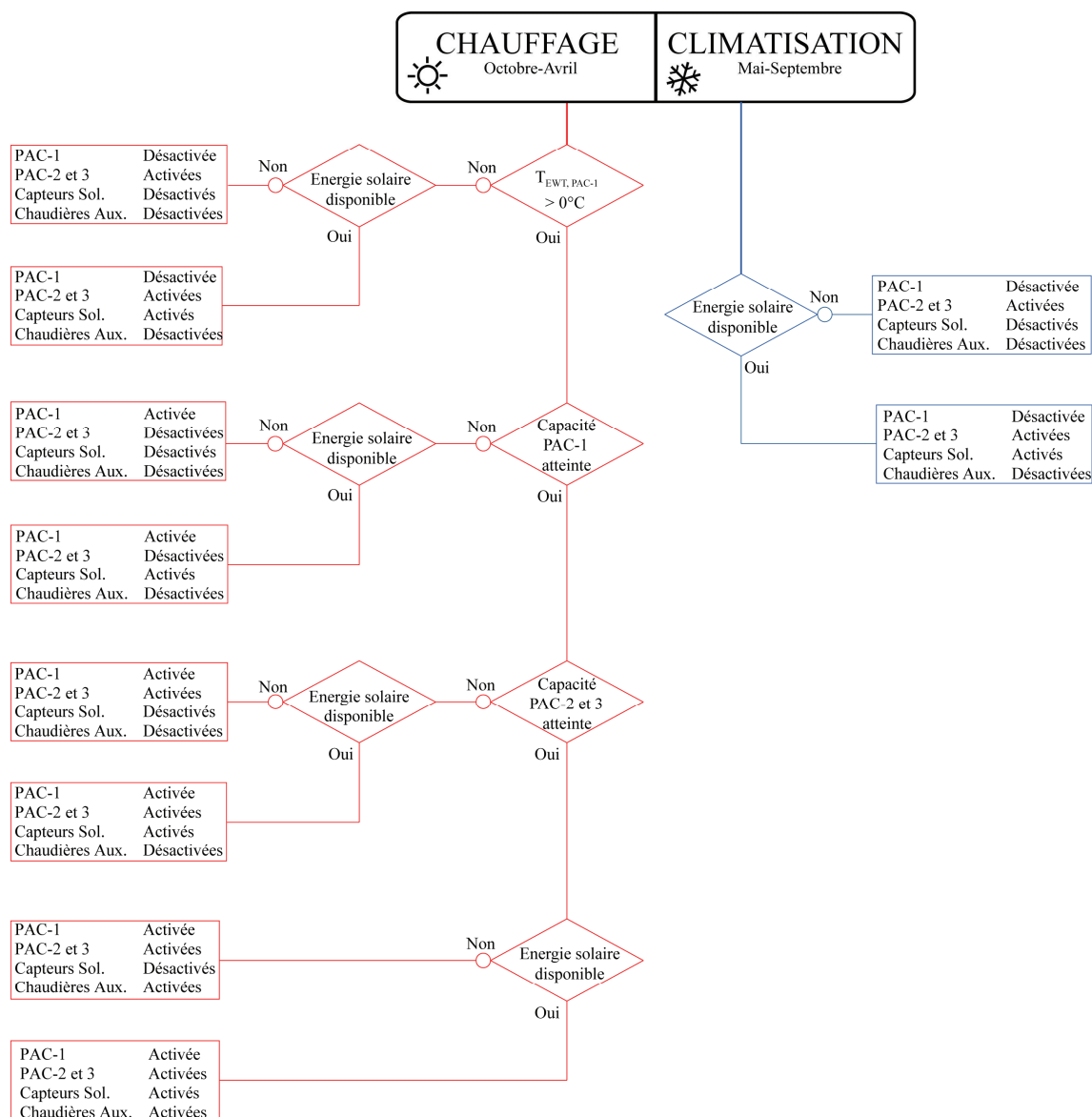


Figure 6.3: Organigramme logique de la séquence de contrôle implantée dans TRNSYS.

6.3.4 Capteurs solaires

À la suite de quelques simulations préliminaires, une surface de 200 m² de capteurs solaires plans est requise pour maintenir une température du fluide à l'entrée des PAC-2 et 3 au-dessus de 0 °C en tout temps. Le rendement des capteurs solaires est tiré des travaux de Sibbitt et al. (2007) pour le cas Okotoks (voir Chapitre 1) et est donné par l'équation illustrée à la Figure 6.4. Cette figure illustre la variation du rendement en fonction de la différence de température entre le

fluide à l'entrée du capteur ($T_{f,in}$) et l'air ambiant (T_{ext}) pour un rayonnement solaire incident global (G) de $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

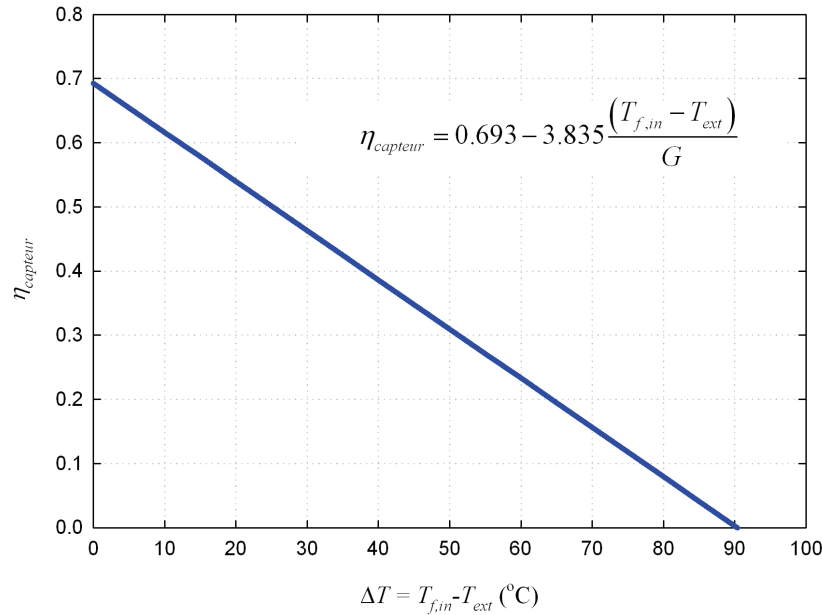


Figure 6.4: Rendement des capteurs solaires en fonction de la différence de température entre le fluide à l'entrée des capteurs et l'air extérieur.

Les capteurs solaires font face au sud et ont une inclinaison de 45° par rapport à l'horizontal. Tel que montré à la Figure 6.2, lors de l'opération simultanée de la PAC-1 et des capteurs solaires, le fluide à la sortie des 9 puits du centre est dirigé en premier vers la PAC-1 puis vers les capteurs solaires. Des simulations préliminaires (non présentées ici) ont indiqué qu'un ordre inverse (c'est-à-dire lorsque les capteurs solaires sont placés avant la PAC-1) donne des résultats similaires.

6.3.5 Charges de chauffage et de climatisation

Les charges de pointe ainsi que les charges mensuelles du bâtiment et des trois serres ont été fournies par l'ingénieur du projet. Cependant, celui-ci n'a pas été en mesure de fournir les charges horaires. Il a donc été nécessaire d'utiliser la méthode suivante pour permettre des simulations horaires. Ainsi, à chaque heure, l'échangeur géothermique doit satisfaire aux charges mensuelles de façon continue sauf durant une période de 6 heures consécutives par mois (au

milieu de chaque mois) où la charge mensuelle est remplacée par une pointe en chauffage ou en climatisation appliquée selon la saison en cours. Il est à noter que les pointes de climatisations sont appliquées durant le jour (apport d'énergie solaire simultané par l'entremise des 9 puits du centre) et que les pointes de chauffage sont appliquées durant la nuit (aucun apport d'énergie solaire).

Le Tableau 6.2 présente les charges thermiques de chauffage et de climatisation utilisées lors des simulations horaires. Ces charges thermiques au sol ont été calculées à partir des charges du bâtiment et des serres (Bernier et al., 2009b) auxquelles un COP moyen de 4 a été appliqué.

Tableau 6.2: Charges de chauffage (+) et de climatisation (-) au sol.

Mois	Pointe de climatisation (kW)	Pointe de chauffage (kW)	Charges mensuelles moyennes (KW)
janvier	non applicable	164.9	113.8
février	non applicable	164.9	117.8
mars	non applicable	164.9	48.8
avril	non applicable	164.9	21.4
mai	-109.9	non applicable	-21.7
juin	-164.9	non applicable	-40.7
juillet	-164.9	non applicable	-49.2
août	-164.9	non applicable	-44.3
septembre	-128.2	non applicable	-37.7
octobre	non applicable	164.9	23.6
novembre	non applicable	164.9	65.6
décembre	non applicable	164.9	107.8
Bilan annuel des charges mensuelles:			24.93

Selon les charges au sol mensuelles présentées au Tableau 6.2, le sol subit un déséquilibre thermique annuel de 24.93 kW. Ceci signifie, qu'en moyenne, 24.93 kW sont extraits du sol en permanence. L'objectif de l'injection solaire est de neutraliser ce déséquilibre au moyen de l'énergie solaire.

6.3.6 Réglages du *proforma* du Type272

Les tableaux 6.3 et 6.4 donnent les valeurs des variables utilisées pour simuler le projet Downsview. Il est à noter que l'Annexe 6 présente un guide d'utilisation du Type272 utile à la compréhension des informations contenues dans cette section.

Tableau 6.3: Variables de l'onglet *Parameter* du *proforma* du Type272.

Variable	Valeur	Unité
Undisturbed ground temperature	10.8	°C
Ground conductivity	2.39	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Ground specific heat	1434	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
Ground density	2000	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Borehole length	146	m
Header depth	1	m
Borehole radius	0.05	m
Borehole thermal resistance	0.1	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
Fluid specific heat	4 190	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
Half amplitude of the surface temperature variation	0	°C
Annual time-lag for surface temperature	0	jour
Charge - Number of boreholes	9	(-)
Charge - Number of borehole branches	9	
Charge - Number of boreholes in branch no – 1	1	
...	...	
Charge - Number of boreholes in branch no – 9	1	(-)
Charge - Total flow rate fraction in branch no -1	0.11111	
...	...	
Charge - Total flow rate fraction in branch no -9	0.11111	
Discharge - Number of boreholes	16	(-)
Discharge - Number of borehole branches	16	
Discharge - Number of boreholes in branch no - 1	1	
...	...	
Discharge - Number of boreholes in branch no – 16	1	(-)
Discharge - Total flow rate fraction in branch no -1	0.0625	
...	...	
Discharge - Total flow rate fraction in branch no -16	0.0625	

Tableau 6.3: Variables de l'onglet *Parameter* du proforma du Type272 (suite).

Variable	Valeur	Unité
MLAA - Number of time steps not aggregated	25	(-)
MLAA - 1st period of aggregation	50	(-)
MLAA - 2nd period of aggregations	200	(-)
MLAA - 3rd period of aggregation	400	(-)
Number of boreholes outputs	6	
Type of borehole output	1	
Borehole chosen as output number – 1	5	(-)
Borehole chosen as output number – 2	6	
Borehole chosen as output number – 3	9	
Borehole chosen as output number – 4	18	
Borehole chosen as output number – 5	20	
Borehole chosen as output number – 6	25	
Number of additional nodes temperature output	jusqu'à 400	(-)
Unit number for input file	11	(-)

Tableau 6.4: Variables de l'onglet *Input* du proforma du Type272.

Variable	Valeur	Unité
Charge - Borefield inlet temperature*	10.8	°C
Charge - Total fluid flow rate	10 215	kg·hr ⁻¹
Discharge - Borefield inlet temperature*	10.8	°C
Discharge - Total fluid flow rate	18 160	kg·hr ⁻¹

*La température du fluide varie selon les autres éléments (charges des bâtiments, capteurs solaires, capacité des pompes à chaleur) du système.

La Figure 6.5 présente le fichier texte (dont l'emplacement est spécifié dans onglet *External Files* du *proforma*) contenant les coordonnées, en mètres, du centre des puits.

Well Number	X (m)	Y (m)
Puits no.1	8.0	8.0
	16.0	8.0
	24.0	8.0
	8.0	16.0
	16.0	16.0
	24.0	16.0
	8.0	24.0
Puits no.9	16.0	24.0
	24.0	24.0
	0.0	0.0
	8.0	0.0
	16.0	0.0
	24.0	0.0
	32.0	0.0
	0.0	8.0
	32.0	8.0
Puits no.17	0.0	16.0
	32.0	16.0
	0.0	24.0
	32.0	24.0
	0.0	32.0
	8.0	32.0
	16.0	32.0
	24.0	32.0
Puits no.25	32.0	32.0

Figure 6.5: Fichier texte contenant les coordonnées du centre des puits pour les deux réseaux indépendants.

6.3.7 Résultats

Les Figures 6.6 à 6.9 montrent les résultats de simulations effectuées avec TRNSYS. Les simulations ont été réalisées avec un pas de temps d'une heure sur une durée de 5 ans (à la demande du client) débutant le 1^{er} mai (2880^{ième} heure de TRNSYS). Bien que les figures présentent les résultats pour chaque réseau de puits, il est utile de rappeler que le Type272 tient compte de l'interaction thermique entre l'ensemble des 25 puits.

Les Figures 6.6 et 6.7 montrent le comportement du système sans injection solaire. Tel qu'attendu, la température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie (Figure 6.7) descend sous 0 °C dès la première période de chauffage et puisque le sol n'est pas suffisamment régénéré thermiquement dans le temps, le profil annuel de la température du fluide est tiré vers le bas durant les années subséquentes. Durant la 5^{ième} année, la température de sortie des 16 puits tourne autour de -7 °C en période de chauffage. À une telle température, la plupart des pompes à chaleur du commerce ne peuvent plus fonctionner.

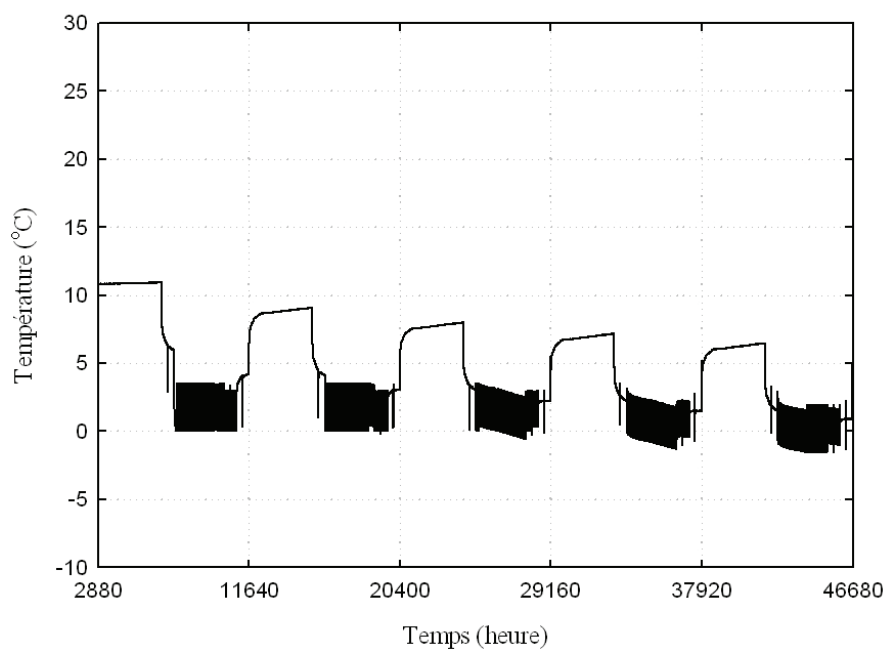


Figure 6.6: Température du fluide à la sortie des 9 puits du centre, également à l'entrée de la PAC-1 ou des capteurs solaires, sur une période de 5 ans – aucune injection solaire.

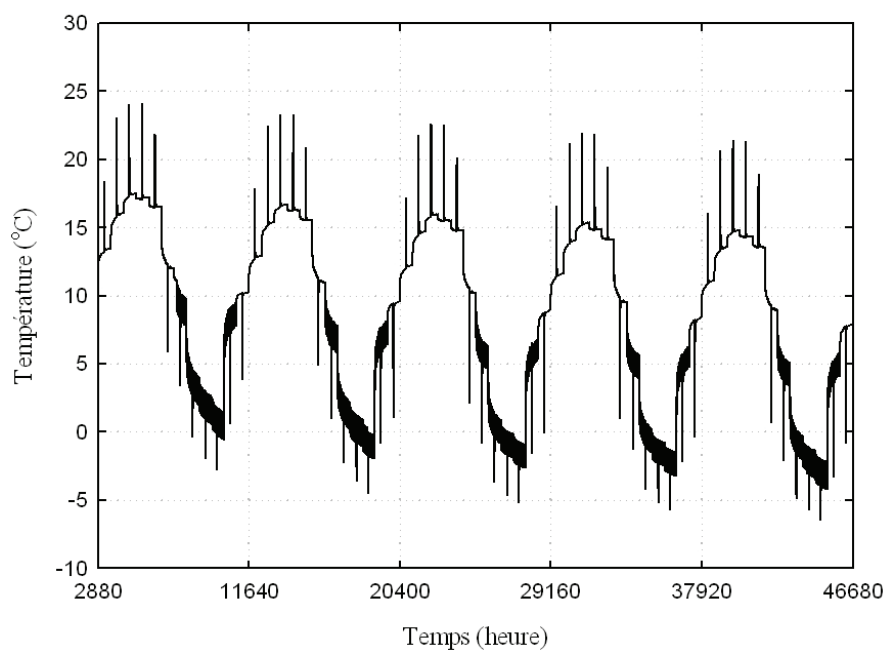


Figure 6.7: Température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie, également à l'entrée des PAC-2 et PAC-3, sur une période de 5 ans – aucune injection solaire.

Pour les 9 puits du centre (voir la Figure 6.6), en période de climatisation, la PAC-1 est désactivée et le fluide ne circule pas dans le circuit, sa température tend alors vers la température du sol au centre de l'échangeur géothermique. En période de chauffage, l'effet du contrôle de la température du fluide à l'entrée de la PAC-1 est clairement illustré à la Figure 6.6. À la Figure 6.6, la température du fluide descend parfois sous 0 °C, notamment à partir de la troisième année, cela est causé par la faible température du sol lorsque le fluide circule vers les capteurs solaires sans passer par la PAC-1.

Les Figures 6.8 et 6.9 montrent les résultats obtenus avec injection solaire. Dans ce cas, la température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie (Figure 6.9) demeure au-dessus de 0 °C en tout temps. L'énergie solaire, principalement collectée durant l'été, permet donc de régénérer thermiquement le sol autour de l'ensemble des puits composant l'échangeur géothermique. Il est à noter que cet apport d'énergie dans le sol n'empêche pas les 16 puits en périphérie de fonctionner correctement durant les périodes de climatisation. Ainsi, la température de sortie ne dépasse pas 24 °C ce qui est tout à fait acceptable pour une pompe à chaleur opérant en climatisation. Pour les 9 puits du centre (Figure 6.8), la température du fluide varie entre 0 °C et 28 °C. Ce domaine de température engendre une différence de température relativement faible entre la température du fluide à l'entrée des capteurs et la température ambiante. Ceci se traduit par un rendement moyen des capteurs relativement élevé, soit environ 64 % durant les 5 années de simulation. Il est à noter que l'énergie solaire annuellement injectée dans l'échangeur géothermique est de 190 MWh, soit une puissance moyenne annuelle de 21.7 kW, une valeur proche du déséquilibre thermique annuel de 24.93 kW déterminée précédemment.

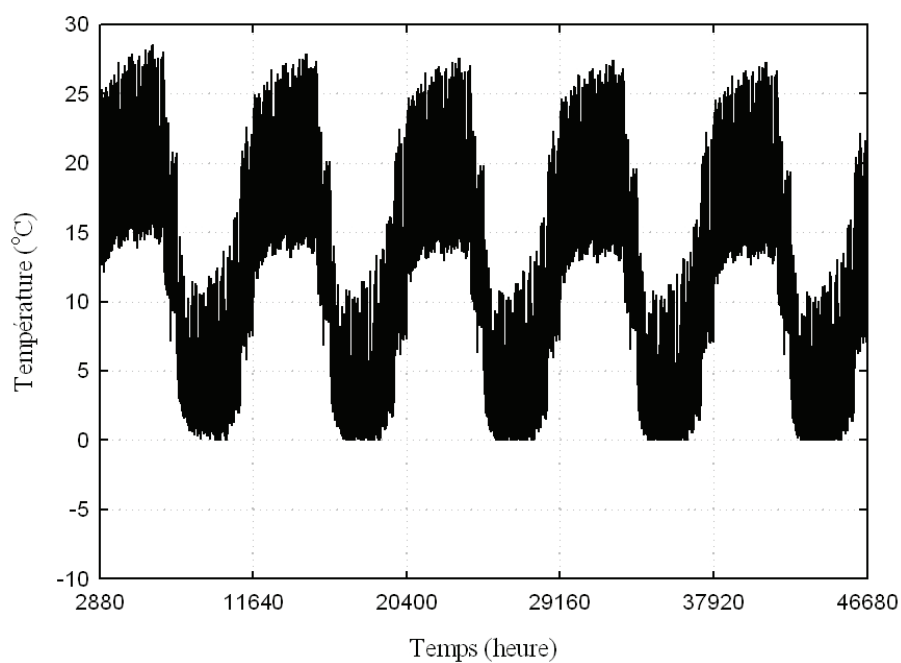


Figure 6.8: Température du fluide à la sortie des 9 puits du centre, également à l'entrée de la PAC-1 ou des capteurs solaires, sur une période de 5 ans – 200 m² de capteurs.

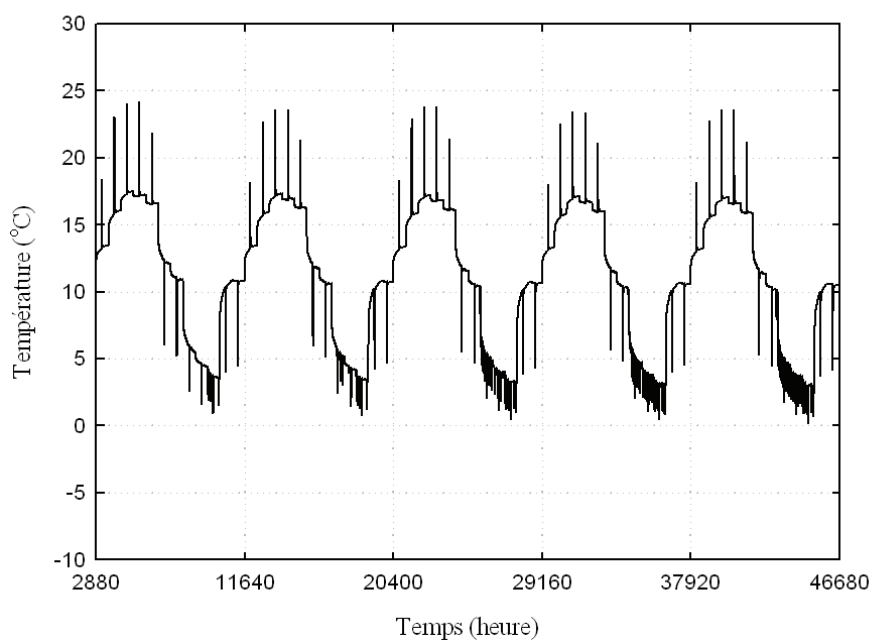


Figure 6.9: Température du fluide à la sortie des 16 puits en périphérie, également à l'entrée des PAC-2 et PAC-3, sur une période de 5 ans – 200 m² de capteurs.

Les Figures 6.10 à 6.13 donnent un aperçu de l'état thermique du sol pour une heure de la simulation, soit le 30 novembre de la 1^{ière} année de simulation à 22h00. Ces figures ont été obtenues par l'ajout de nœuds supplémentaires (non présentés à la Figure 6.5) dont l'emplacement est indiqué sur les Figures 6.10, 6.12 et 6.13. Il est utile de rappeler que la température du sol donnée par le modèle proposé est en fait la température moyenne du sol sur la longueur d'un puits. Durant le mois de novembre, le système de puits géothermique opère en mode de chauffage. Puisque la charge de chauffage à ce moment dépasse la capacité de la PAC-1 et que la température du fluide à l'entrée de la PAC-1 est supérieure à 0 °C, l'ensemble des 25 puits est sollicité. Pour cette heure, il n'y a pas de recharge solaire (nuit) et les températures du fluide à l'entrée du réseau de 9 puits et de celui de 16 puits sont respectivement de -3.92 °C et 10.48 °C, tandis que les températures de sortie sont respectivement de 0.76 °C et 10.90 °C. La température extérieure est de -2.15 °C.

La Figure 6.10 montre une vue en plan de l'ensemble des 25 puits. Un total de 400 nœuds supplémentaires a été utilisé pour générer la Figure 6.10. On observe qu'il subsiste encore de l'énergie solaire accumulée durant l'été puisque la température entre les puits est supérieure à la température non perturbée du sol de 10.8 °C. Tel qu'indiqué à la Figure 6.11 pour cinq puits, la température à la paroi des puits du centre varie entre 2.65 et 2.67 °C alors que la température à la paroi des puits en périphérie varie entre 11.03 °C et 11.08 °C. Les Figures 6.12 (181 nœuds supplémentaires) et 6.13 (85 nœuds supplémentaires) présentent une vue détaillée de la distribution de température autour du puits encadré à la Figure 6.10.

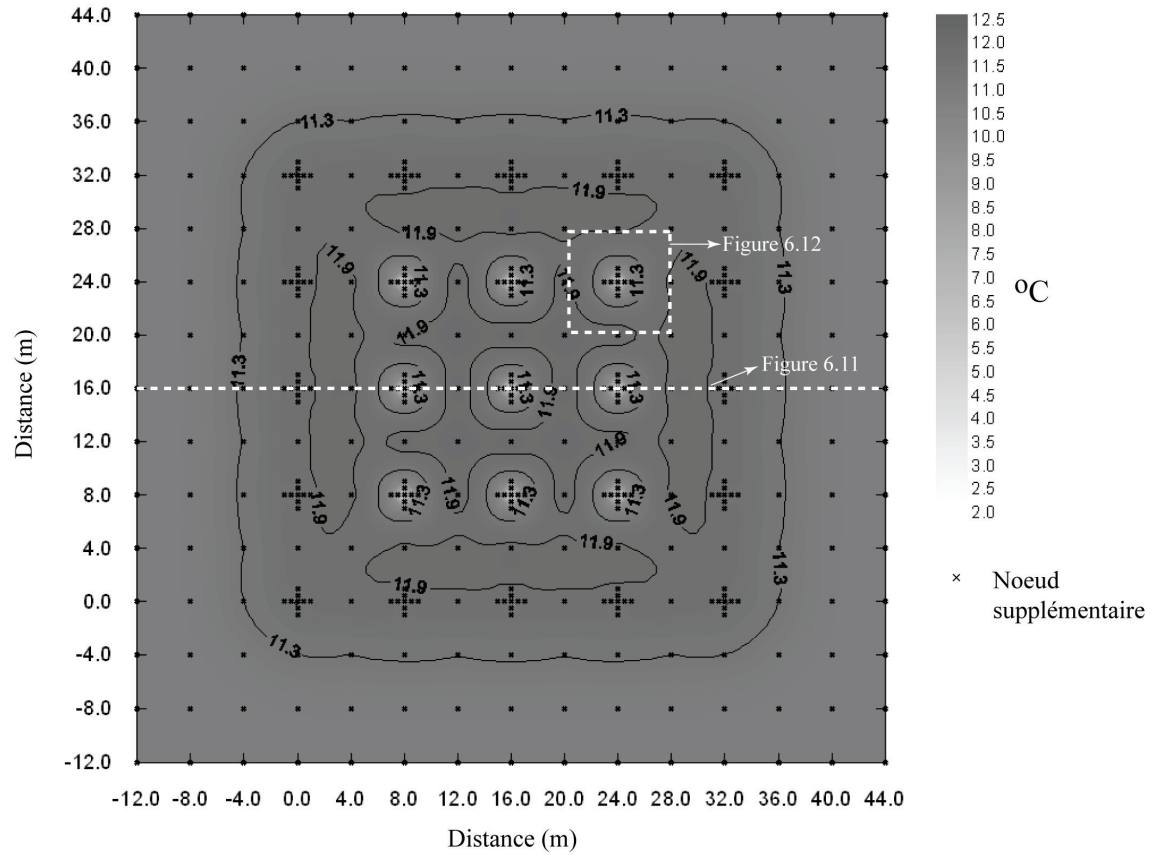


Figure 6.10: Température moyenne du sol entourant les 25 puits de l'échangeur géothermique.

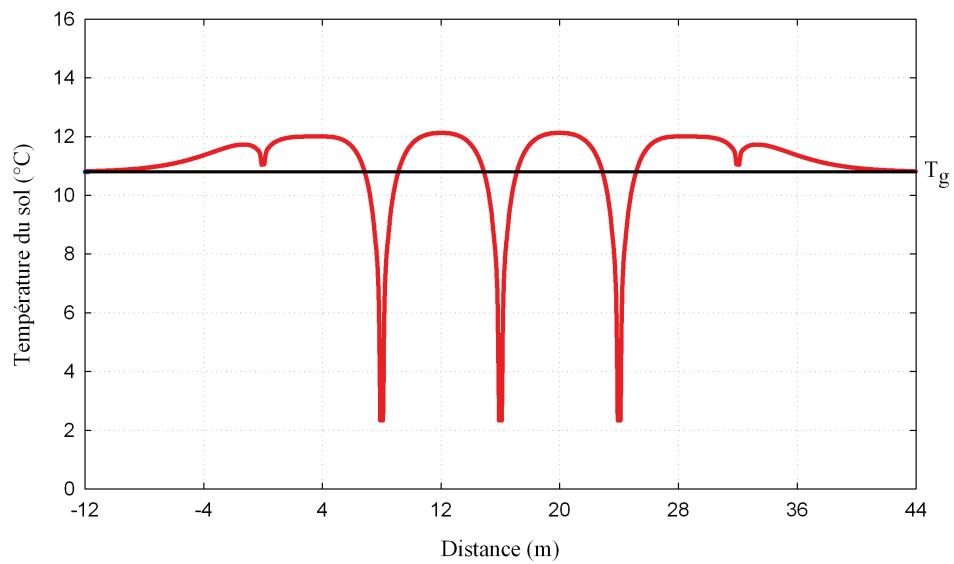


Figure 6.11: Température moyenne du sol en $y = 16$ m.

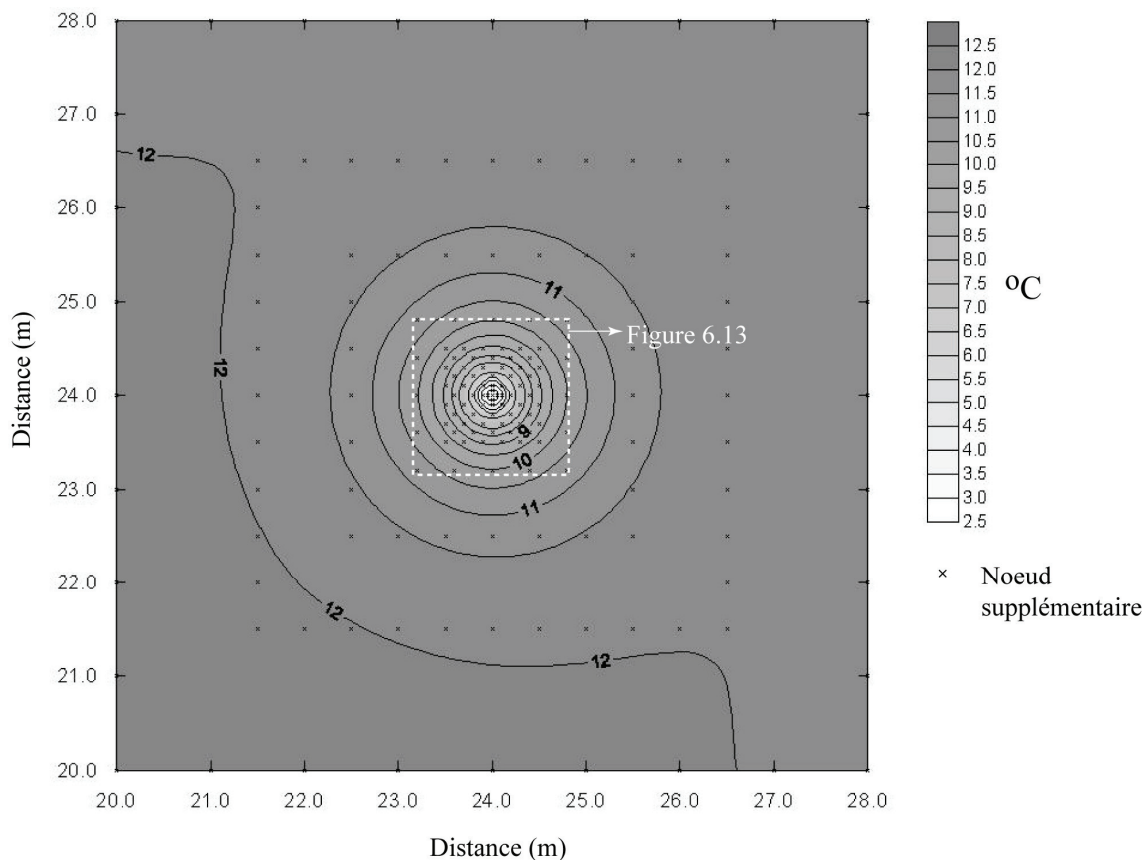


Figure 6.12: Température moyenne du sol selon l'encadré de la Figure 6.10.

Les résultats présentés aux Figures 6.10 à 6.12 confirment la forme du profil de température du sol attendu, soit une température plus élevée vers le centre de l'échangeur géothermique, là où la recharge thermique a lieu. Pour le puits encadré à la Figure 6.10 et présenté aux Figures 6.12 et 6.13, l'asymétrie de température autour du puits s'estompe avec la diminution de la distance au puits et n'est plus perceptible à l'intérieur d'un rayon d'un mètre autour du puits.

La Figure 6.13 indique également que l'influence thermique du puits, opérant en mode chauffage depuis deux mois, sur la température du sol, est limitée à un rayon d'environ 0.8 mètre autour du puits. Le gradient thermique dans le sol au rayon du puits est de $30.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ et diminue quasi linéairement selon le logarithme de la distance au puits pour atteindre $2.62\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ à 0.8 mètre du puits.

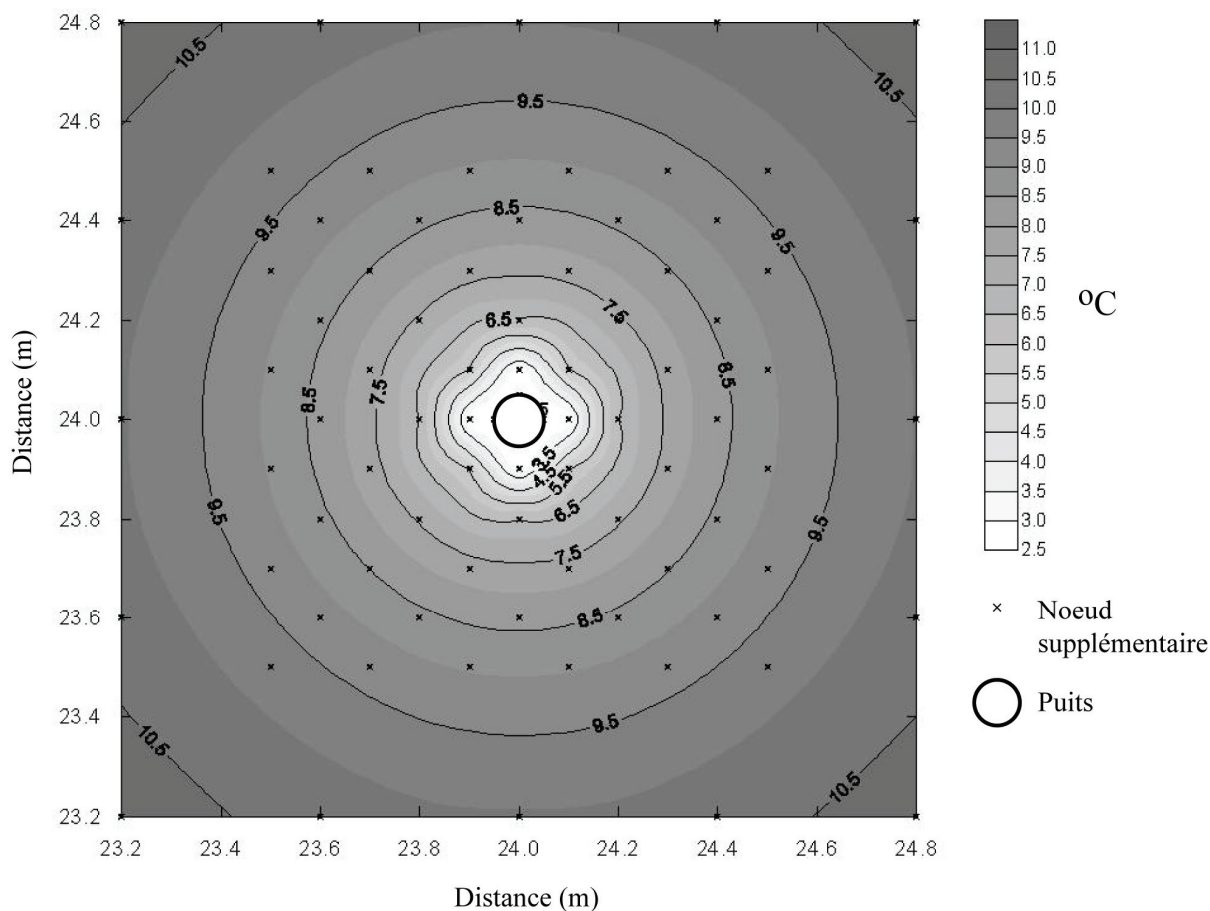


Figure 6.13: Température moyenne du sol selon l'encadré de la Figure 6.12.

6.4 Application no.2 (projet Drake Landing - Okotoks)

Les travaux réalisés dans le cadre du projet Drake Landing consistent à l'étude d'un nouveau concept d'échangeur géothermique dédié au stockage d'énergie solaire et uniquement destiné au chauffage des bâtiments excluant l'eau chaude (Chapuis et Bernier, 2009). Ce nouveau concept d'échangeur géothermique est basé sur les critères de conception du cas Okotoks (Sibbitt et al., 2007), tel que décrit au Chapitre 1, et est présenté comme une alternative à celui-ci. Le nouveau concept consiste en l'insertion de deux tubes en U par puits (un seul dans le cas Okotoks) fonctionnant de manière indépendante l'un de l'autre. De cette façon, l'échangeur géothermique est composé de deux réseaux indépendants de tubes en U. Un des réseaux est connecté à une série de capteurs solaires et fait circuler le fluide du centre vers la périphérie du BTES (réseau de charge) tandis que l'autre réseau assure le chauffage des bâtiments et fait circuler le fluide de la périphérie vers le centre du BTES (réseau de décharge). Aussi, le nouveau concept nécessite une surface de capteurs solaires moins grande que dans le cas Okotoks grâce à l'intégration de pompes à chaleur dans le système.

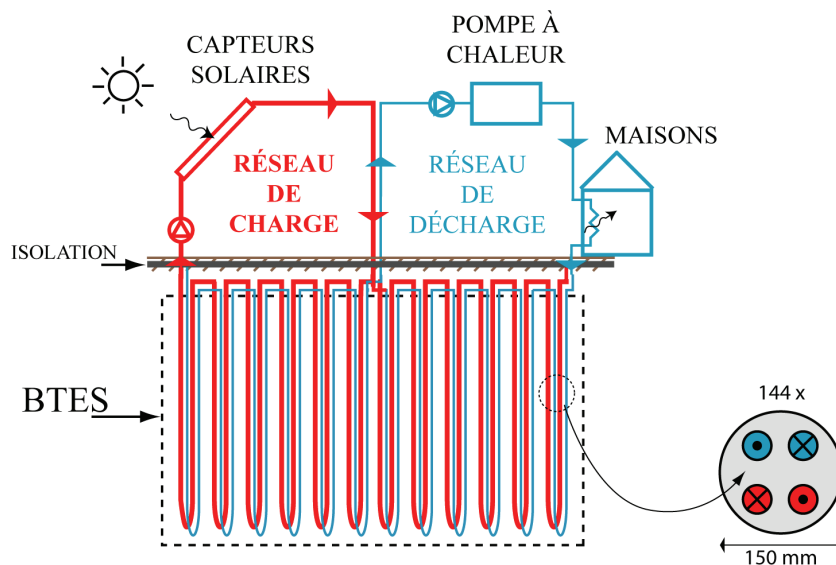


Figure 6.14: Représentation schématique du système avec le BTES à double tubes en U par puits, formant deux réseaux de conduites indépendantes.

Selon ce concept à double tubes en U par puits, on peut définir deux principales relations d'échange thermique: l'échange de chaleur par puits (c'est-à-dire entre chacun des tubes en U) et l'échange de chaleur entre le sol composant le BTES et les puits, incluant les interactions entre les puits eux-mêmes.

Les principaux objectifs de cet arrangement sont de favoriser la stratification radiale du sol composant l'échangeur géothermique et de maintenir la température de ce sol à un niveau proche de la température non perturbée du sol afin de diminuer les pertes thermiques. De plus, en ayant deux circuits hydrauliquement découplés, la régulation est plus simple comparativement au cas Okotoks.

6.4.1 Programme de simulation et modélisation de l'échangeur géothermique

L'ensemble du système est simulé avec le programme TRNSYS et le nouveau concept de BTES est simulé par le modèle DST modifié. Comme le modèle DST, le modèle DST modifié suppose une répartition uniforme des puits dans le volume de sol attribuable au BTES se rapprochant d'un arrangement hexagonal des puits entre eux et au global (voir la Figure 3.3).

6.4.2 Caractéristiques de l'échangeur géothermique

Les caractéristiques du BTES étudié sont présentées au Tableau 6.5. Le BTES est soumis au même climat que dans le cas Okotoks, soit le climat de Calgary (Alberta), Canada et la température non perturbée du sol est définie comme la température moyenne de l'air dans cette région. Le BTES est composé de 144 puits divisés en 24 branches parallèles de 6 puits en séries, chaque puits accueille deux tubes en U, soit un pour chaque réseau indépendant.

Tableau 6.5: Principales caractéristiques du système de stockage d'énergie solaire par puits géothermique à double tubes en U.

Paramètre	Valeur	Unité
BTES		
Volume	88 000	m ³
Sol		
Conductivité thermique	2.11	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Diffusivité thermique	1.055·10 ⁻⁶	m ² ·s ⁻¹
Température non perturbée du sol	6.4	°C
Isolation à la surface (disque)		
Épaisseur	0.20	m
Extension au-delà du rayon du BTES	7	m
Conductivité thermique	0.043	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Puits		
Nombre total	144 (24 x 6)	(-)
Longueur	35	m
Diamètre	0.15	m
Espacement	4.5	m
Prof. tête de puits	1	m
Résistance du puits, R_b	0.223	m·K·W ⁻¹
Débits par tube en U		
Réseau de charge (24 x 6 puits)	600	kg·hr ⁻¹
Réseau de décharge (24 x 6 puits)	3 542	kg·hr ⁻¹

6.4.3 Réseau de décharge

Le BTES est utilisé afin de satisfaire les besoins en chauffage (excluant l'eau chaude) de 52 maisons unifamiliales comme dans le cas Okotoks. Afin de simplifier l'analyse des besoins en chauffage, la charge de chauffage des maisons, $q_{Chauffage}$ est posée comme dépendante uniquement de la température de l'air extérieure, T_{ext} , selon l'équation obtenue à partir des résultats présentés par Sibbitt et al. (2007):

$$q_{Chauffage} = 0.1334(13.88 - T_{ext}) \cdot 52 \quad (6.1)$$

L'Équation 6.1 indique implicitement qu'aucun chauffage n'est requis lorsque la température extérieure, T_{ext} est supérieure à 13.88 °C. Sur une base annuelle, l'énergie de chauffage consommée par les 52 maisons est de 2 328 GJ (646 MWh) pour le climat de Calgary. Le débit total de circulation du fluide dans le réseau de charge relié aux maisons est de 85 000 kg·hr⁻¹, ce qui correspond approximativement à une chute de 3 °C de la température du fluide en période de pointe de chauffage selon les critères de conception mentionnés.

Les PAC utilisées sont de type eau-air. La valeur du COP des PAC en mode chauffage est montrée à la Figure 6.15 en fonction de la température du fluide à l'entrée de celles-ci. Cette courbe est basée sur les données de performance de pompes à chaleur du commerce. Il est à noter que la température minimum du fluide à l'entrée de la pompe à chaleur est fixée à -6.7 °C selon les recommandations du manufacturier.

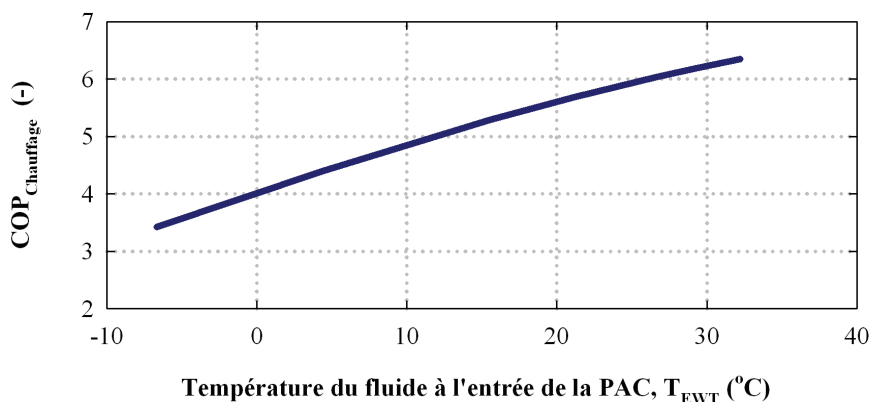


Figure 6.15: COP des pompes à chaleur en mode chauffage.

6.4.4 Réseau de charge

Le réseau de charge est relié à des capteurs solaires plans dont le rendement est donné par l'équation présentée à la Figure 6.4. Les capteurs solaires couvrent une surface de 573 m² (4 fois moins que dans le cas Okotoks) et sont orientés vers le sud avec une inclinaison de 45° par rapport à l'horizontal. Tous les capteurs solaires sont alimentés en parallèle.

6.4.5 Résultats

Les simulations au pas de temps d'une heure ont été réalisées sur une durée de 5 ans débutant un 1^{er} avril (2160^{ième} heure de TRNSYS). L'évolution de la température moyenne du sol composant le BTES est présentée à la Figure 6.16. Le système atteint un régime d'opération annuel quasi permanent au niveau de la température moyenne du sol à la 5^{ième} année d'opération avec des faibles variations (< 5%) de température entre la 4^{ième} et la 5^{ième} année. Durant la 5^{ième} année, la température moyenne du volume de stockage varie de 10 °C à 16 °C. Par comparaison, pour le cas Okotoks réel, la température prévue du sol à la fin de l'été en régime permanent (après environ 5 ans d'opération du système) est de 80 °C (Ressources naturelles Canada, 2009). Pour fin de comparaison également, la Figure 6.16 présente les résultats pour le cas où tous les puits à double tubes en U sont alimentés en parallèle plutôt que par 24 branches de 6 puits en séries. La différence de température moyenne annuelle à la 5^{ième} année, pour les deux cas présentés à la Figure 6.16, n'est que de 0.51 °C. Cet écart relativement faible remet en question l'intérêt de tenter de favoriser la stratification radiale du volume de stockage par une configuration des puits alimentés en série.

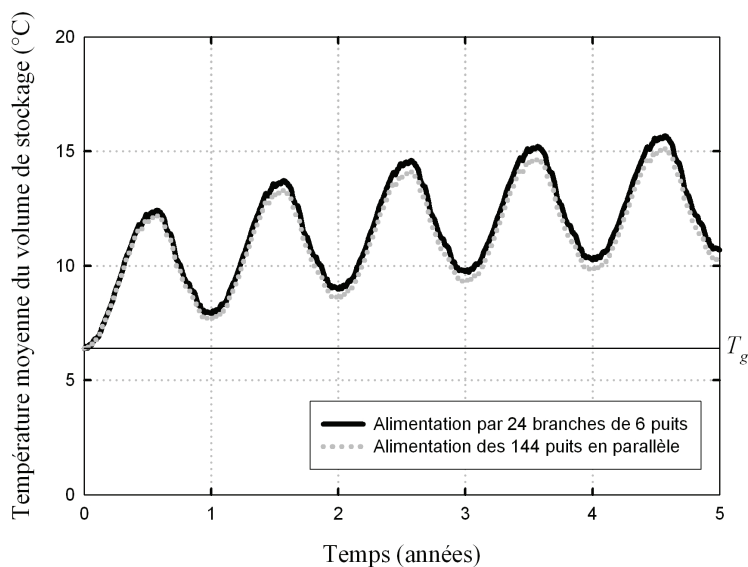


Figure 6.16: Évolution de la température moyenne du sol composant le BTES et comparatif avec une alimentation en parallèle des puits.

La température du fluide à la sortie du BTES pour le réseau de décharge (alimentation des maisons en chauffage) présentée à la Figure 6.17, respecte la limite minimum de température à l'entrée des pompes à chaleur de -6.7°C durant les 5 années de simulation. Le profil annuel suit la tendance d'augmentation de température, année après année, en accord avec l'évolution de la température moyenne du volume de stockage (voir la Figure 6.16). Le cycle annuel de la température du fluide à la sortie du BTES est causé par une recharge thermique du sol en été jumelé à une faible demande en chauffage des bâtiments (hausse de la température) et une forte demande en chauffage en hiver jumelé à une diminution du rayonnement solaire et incidemment, de la recharge thermique du sol (baisse de la température).

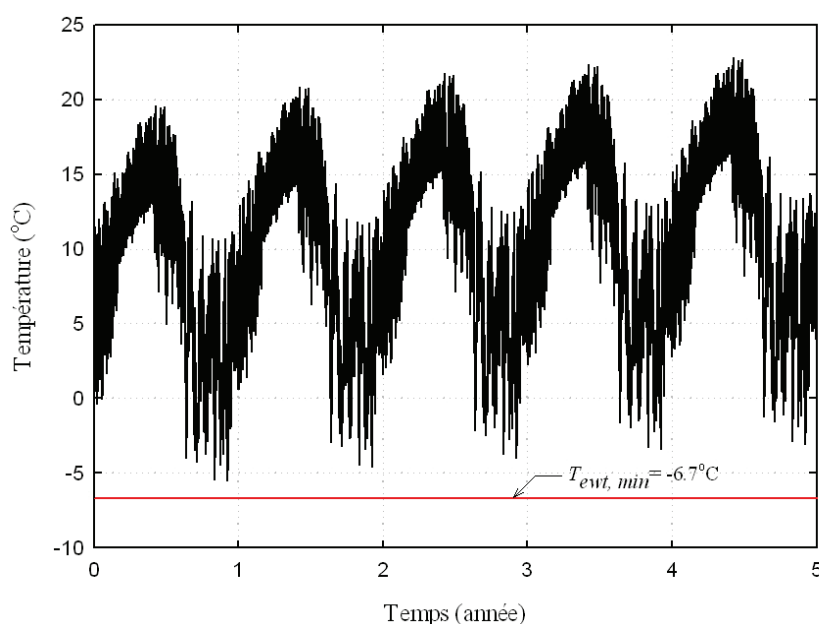


Figure 6.17: Température du fluide à la sortie du réseau de décharge, également à l'entrée des PAC.

La Figure 6.18 montre l'état thermique du système à une certaine heure arbitraire de la simulation. Pour cette heure, les capteurs solaires ont un rendement de 63% (210 kW transmis au fluide circulant dans les capteurs pour un rayonnement incident total se traduisant par une puissance solaire de 333 kW sur la surface de capteurs) pour une température d'entrée du fluide au capteur de 16°C et une température extérieure de 9.6°C . L'écart entre la température moyenne du sol attribuable au BTES et la température non perturbée du sol est de 3°C , ceci se

reflète par des pertes thermiques de 2.03 kW du BTES (les pertes thermiques sont une moyenne à l'intérieur d'un pas de temps dt du modèle DST, puisque le modèle DST calcule les pertes thermiques du volume de stockage seulement aux pas de temps dt , soit 58.75 heures pour cette application). Du côté du réseau de décharge, le fonctionnement des pompes à chaleur permet d'obtenir un COP de 5 pour des besoins en chauffage de 30 kW.

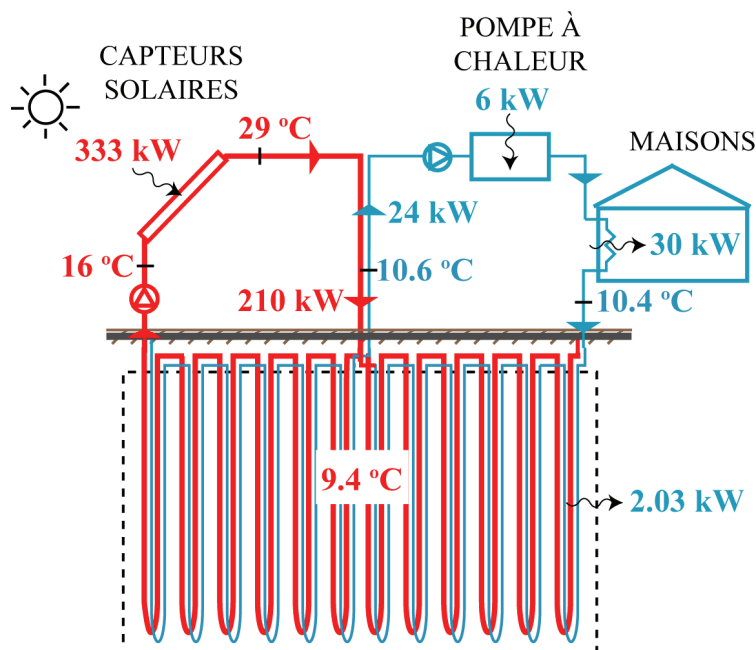


Figure 6.18: État du système à l'heure 20 579 (durant le mois de mai de la 3^{ème} année de simulation).

Pour la 5^{ème} année d'opération, le bilan énergétique mensuel est présenté à la Figure 6.19 tandis que les résultats annuels sont donnés au Tableau 6.6. Le Tableau 6.6 comprend aussi des données tirées du cas Okotoks et les résultats pour le même système à double tubes en U mais où l'alimentation des puits se fait en parallèle pour les 144 puits. Tel que décrit précédemment, le système de stockage étudié comprend une surface de capteurs solaires quatre fois moindre que dans le cas Okotoks, deux tubes en U par puits et inclut l'utilisation de pompes à chaleur.

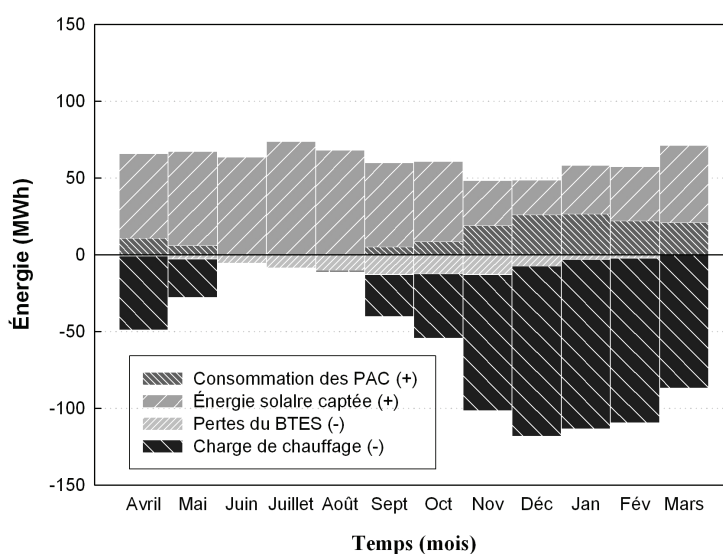


Figure 6.19: Bilan d'énergie mensuel pour la 5^{ème} année.

Tableau 6.6: 5^{ème} année – Sommaire des résultats annuels – Comparaison entre le système alternatif à double tubes en U proposé selon deux types d'alimentation des puits et le cas Okotoks*.

Résultats des simulations	Double tubes en U alimentation par 24 branches de 6 puits séries / (alimentation par 144 puits en parallèle)	Okotoks*	unités
Rendement des capteurs solaires	0.58 (0.59)	0.29	(-)
Énergie collectée par les capteurs solaires	598 (600)	1 134	MW·h
Énergie injectée dans le BTES (le système à double tubes en U ne considère pas les pertes entre les capteurs et le BTES)	598 (600)	573	MW·h
Énergie consommée par les PAC	144 (146)	non applicable	MW·h
Énergie consommée par les chaudières	non applicable	66	MW·h
Pertes thermiques du BTES	82 (87)	347	MW·h
Rapport entre les pertes thermiques et l'énergie injectée dans le BTES	14 (15)	61	%
Température moyenne du sol du BTES	12.96 (12.45)	80**	°C
Fraction solaire/géothermique du système	0.78 (0.77)	0.90	(-)

*Le cas Okotoks (Sibbitt et al., 2007) inclut les pertes thermiques dans le réseau de conduites. Aussi, une partie de l'énergie collectée par les capteurs solaires est dirigée vers les maisons sans passer par le BTES.

**Température prévue à la fin de l'été en régime annuel permanent d'opération

Pour le système à double tubes en U, les pertes thermiques représentent 14 % de l'énergie solaire injectée dans le BTES comparativement à 61 % pour le cas Okotoks. Ceci est lié au fait que la température moyenne du BTES est en général beaucoup plus faible que dans le cas d'Okotoks. De plus, cette basse température engendre de bien meilleurs rendements pour les capteurs solaires. Ainsi, le rendement annuel moyen des capteurs est de 58 % alors qu'il n'est que de 29 % dans le cas d'Okotoks.

Suivant les résultats présentés au Tableau 6.6, il est démontré qu'il n'y a pas de différence significative sur les performances d'un système à double tubes en U où l'alimentation des puits se fait en parallèle plutôt qu'en série. Le raccordement des puits pour une alimentation en série et de manière radiale dans le volume de stockage n'est pas justifié selon ces résultats. Dans la perspective où il est moins coûteux de raccorder l'ensemble des puits en parallèle, ce type de branchement devrait être privilégié. Il est également à noter qu'un raccordement en parallèle permet d'isoler plus facilement un puits défectueux et permet un meilleur contrôle de l'échangeur géothermique puisque l'opérateur peut agir directement sur chaque puits.

6.5 Application no.3 (quatre tuyaux dans un puits)

Cette application porte sur la modélisation d'un puits géothermique muni de quatre tuyaux et branché de façon à former deux réseaux indépendants. Puisque le Type272 est initialement conçu pour la modélisation de chaque puits comme étant une entité homogène où les effets thermiques attribuables aux éléments internes du puits sont pris en charge par la résistance thermique effective, tel que décrit à la section 2.1.1, des changements sont à apporter dans l'utilisation de certains paramètres. Ainsi, le paramètre *Borehole thermal resistance* devient la résistance thermique entre le fluide et le rayon externe du tuyau (identique pour chaque tuyau). Le paramètre *Ground conductivity* devient la conductivité thermique dans le sol et dans le coulis (hypothèse implicite que le sol et le coulis ont les mêmes propriétés thermiques). Le paramètre *Number of boreholes (Charge ou Discharge)* devient le nombre de tuyaux. Le paramètre *Borehole radius* devient le rayon externe d'un tuyau.

6.5.1 Réglages du *proforma* du Type272 pour l'application no.3

Tableau 6.7: Variables de l'onglet *Parameter* du *proforma* du Type272.

Variable	Valeur	Unité
Undisturbed ground temperature	10	°C
Ground conductivity	2.5	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Ground specific heat	1250	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
Ground density	2000	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Borehole length	100	m
Header depth	1	m
Borehole radius	0.016	m
Borehole thermal resistance	0.1	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
Fluid specific heat	4 190	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
Half amplitude of the surface temperature variation	0	°C
Annual time-lag for surface temperature	0	jour
Charge - Number of boreholes	2	(-)
Charge - Number of borehole branches	1	(-)
Charge - Number of boreholes in branch no - 1	2	(-)
Charge - Total flow rate fraction in branch no -1	1	(-)
Discharge - Number of boreholes	2	(-)
Discharge - Number of borehole branches	1	(-)
Discharge - Number of boreholes in branch no – 1	2	(-)
Discharge - Total flow rate fraction in branch no -1	1	(-)
MLAA - Number of time steps not aggregated	25	(-)
MLAA - 1st period of aggregation	50	(-)
MLAA - 2nd period of aggregations	200	(-)
MLAA - 3rd period of aggregation	400	(-)
Number of boreholes outputs	4	(-)
Type of borehole output	1	(-)
Borehole chosen as output number – 1	1	(-)
Borehole chosen as output number – 2	2	(-)
Borehole chosen as output number – 3	3	(-)
Borehole chosen as output number – 4	4	(-)
Number of additional nodes temperature output	238	(-)
Unit number for input file	11	(-)

Tableau 6.8: Variables de l'onglet *Input* du *proforma* du Type272.

Variable	Valeur	Unité
Charge - Borefield inlet temperature	35	°C
Charge - Total fluid flow rate	800	kg·hr ⁻¹
Discharge - Borefield inlet temperature	2	°C
Discharge - Total fluid flow rate	800	kg·hr ⁻¹

La Figure 6.20 présente le fichier texte (dont l'emplacement est spécifié dans l'onglet *External Files* du *proforma*) contenant les coordonnées, en mètre, du centre des puits (c.-à-d. les tuyaux dans ce cas-ci) pour cette application. Les deux premières lignes du fichier concernent les tuyaux du tube en U du réseau de charge et les deux dernières, les tuyaux du tube en U du réseau de décharge. La Figure 6.21 montre l'emplacement des quatre tuyaux les uns par rapport aux autres dans le puits. Le fluide entre dans le tuyau no.1 et sort par le tuyau no.2 dans le réseau de charge tandis que le fluide entre dans le tuyau no.3 et sort par le tuyau no.4 dans le réseau de décharge.

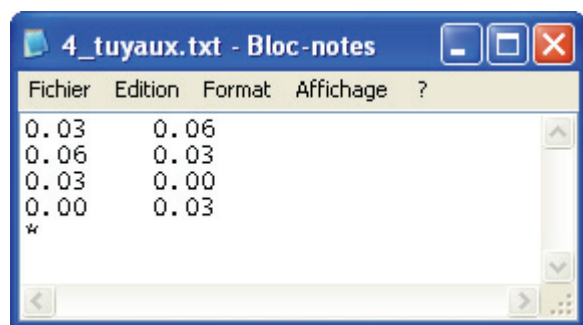


Figure 6.20: Fichier texte contenant les coordonnées du centre des quatre tuyaux.

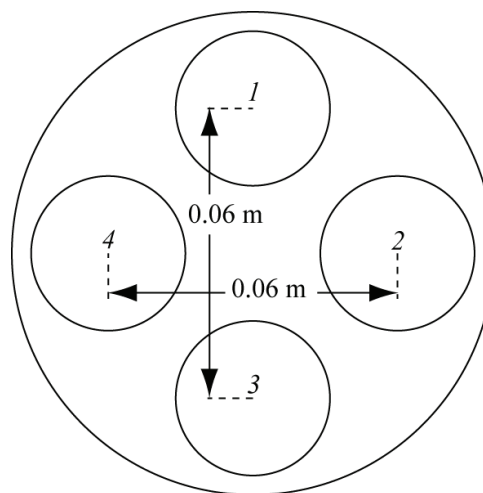


Figure 6.21: Disposition des tuyaux no.1 à 4 dans le puits.

6.5.2 Résultats

La Figure 6.22 montre l'état thermique du sol entourant les quatre tuyaux après 10h de simulation pour les conditions mentionnées aux Tableaux 6.7 et 6.8. Un total de 121 nœuds supplémentaires est utilisé pour générer la Figure 6.22.

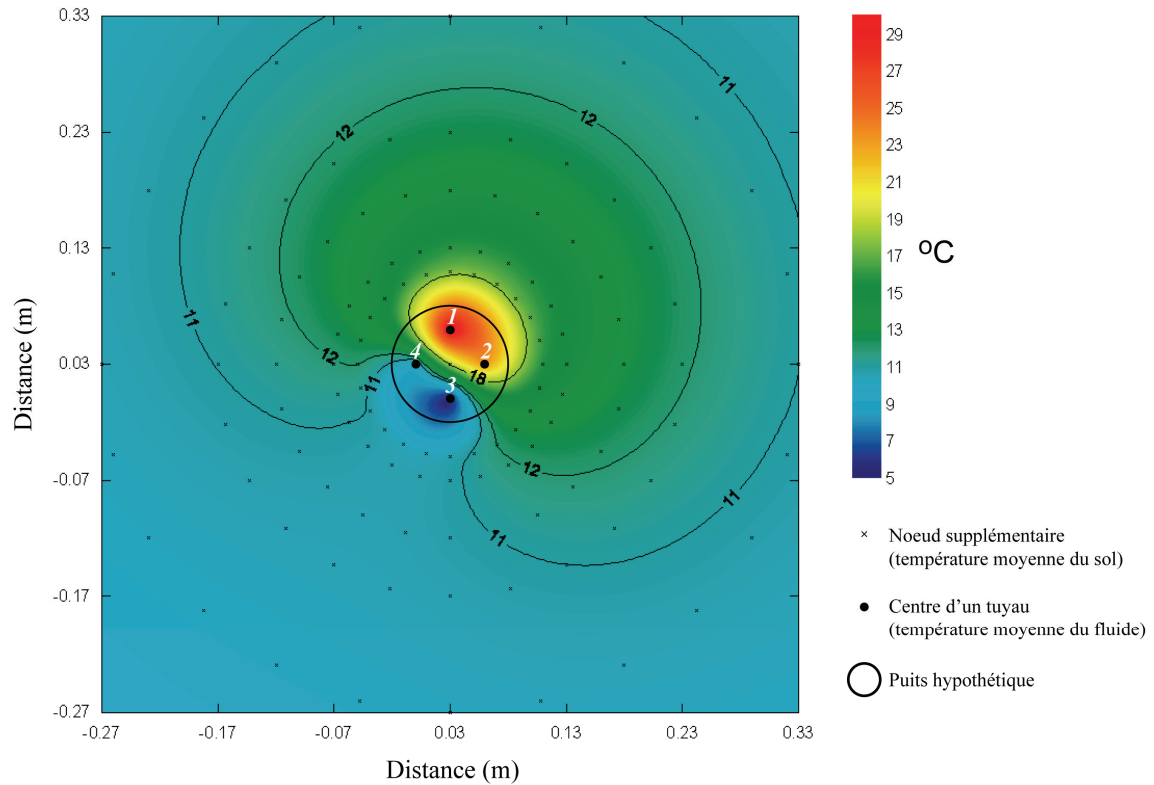


Figure 6.22: Température moyenne du sol entourant les quatre tuyaux et température moyenne du fluide circulant dans les quatre tuyaux à l'intérieur d'un puits, après 10 heures.

Tableau 6.9: Température du fluide à l'entrée et à la sortie et température au rayon externe des tuyaux après 10 heures.

Tuyaux no.	$T_{f,in}$	$T_{f,out}$	$T_{r_{ext}}$	Unité
1	35	25.93	20.48	°C
2	25.93	21.13	17.38	°C
3	2	7.9	9.45	°C
4	7.9	11.28	11.52	°C

L'utilisation du Type272 pour la modélisation de chaque tuyau dans un puits reste à être validée. Rappelons que le Type272 considère la température à la paroi des tuyaux (pour ce cas, sinon à la paroi des puits) constante et que le calcul de l'effet thermique d'un tuyau sur un autre (pour ce cas, sinon d'un puits sur un autre) se fait par leurs coordonnées centre à centre. Cette hypothèse a été validée (voir Chapitre 5) lorsque le Type272 est utilisé pour la modélisation de puits comme entité homogène et pour un certain espacement entre les puits.

La Figure 6.23 présente l'évolution de la température du fluide à la sortie de chacun des quatre tuyaux sur une période de 10h.

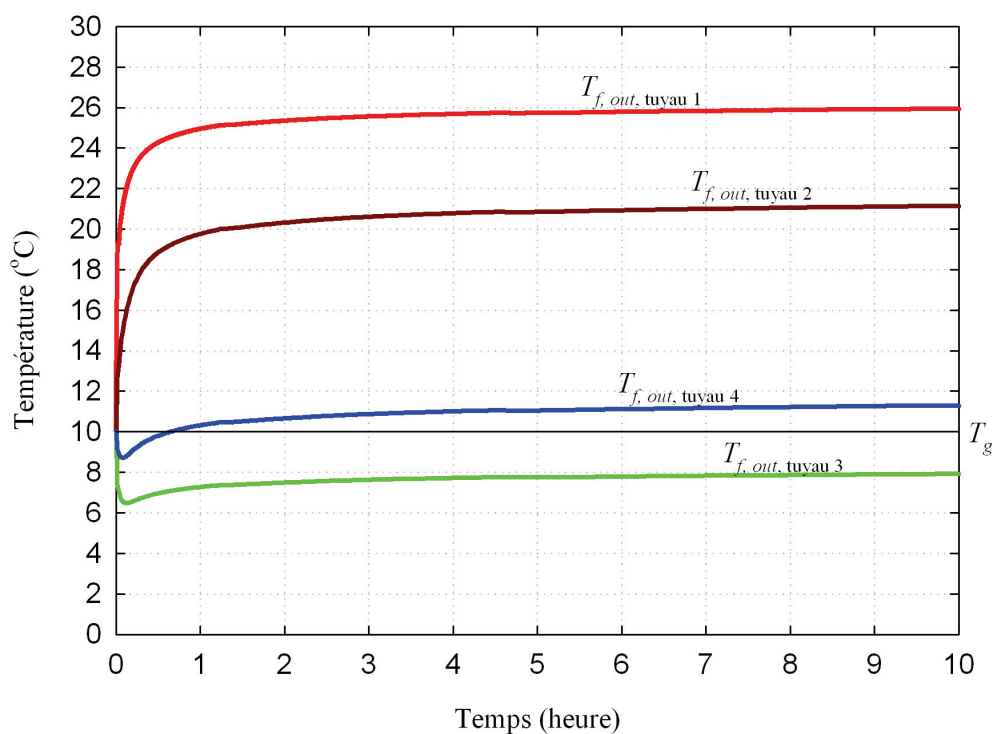


Figure 6.23: Température du fluide à la sortie de chacun des quatre tuyaux.

6.6 Résumé

Deux applications du Type272 et une application du modèle DST modifié sont présentées. Le modèle proposé est utilisé pour la modélisation d'un champ de 25 puits destiné au stockage thermique avec recharge solaire dans la région de Toronto, Canada. La capacité du modèle proposé à représenter deux réseaux indépendants de puits est exploitée en assignant 9 puits à la recharge thermique du sol et au chauffage des bâtiments, tandis que 19 puits non reliés aux capteurs solaires, servent au chauffage et à la climatisation des bâtiments. Les propriétés des puits et la surface de capteurs solaires sont déterminées de manière à respecter une limite de température du fluide à l'entrée des pompes à chaleur de 0 °C.

Le modèle DST modifié pour la modélisation d'un champ de 144 puits à double tubes en U fonctionnant selon deux réseaux indépendants est utilisé dans l'étude d'une alternative au cas Okotoks pour le stockage thermique avec recharge solaire. Cette alternative propose de diminuer la température d'opération du sol dans l'échangeur géothermique dans le but de diminuer les pertes thermiques. Le système proposé satisfait aux mêmes charges thermiques des bâtiments que le cas Okotoks, mais avec une surface réduite de capteurs solaires et l'intégration de pompes à chaleur dans le système. L'échangeur géothermique est conçu de manière à respecter une limite de température du fluide à l'entrée des pompes à chaleur de -6.7 °C. Les résultats indiquent qu'il n'y a pas de différence significative entre une alimentation des puits par des branches de puits en série ou tout en parallèle.

Le modèle proposé est finalement utilisé pour la modélisation des quatre tuyaux composant les deux tubes en U d'un puits alimenté par deux réseaux indépendants. Ce type d'application reste à être validé compte tenu de la proximité des tuyaux dans un puits et des hypothèses utilisés par le modèle proposé dont une température uniforme à la paroi externe d'un tuyau et le calcul des interactions thermiques entre les tuyaux par leurs coordonnées centre à centre.

CONCLUSION

Cette étude porte principalement sur l'étude de trois modèles d'échangeur géothermique pouvant modéliser le stockage thermique saisonnier dans un champ de puits géothermiques verticaux en boucle fermée, soit le modèle DST, le modèle DST modifié et un nouveau modèle proposé. Les trois modèles sont basés sur des équations de transfert de chaleur dans le sol par conduction uniquement.

6.7 Contributions de la présente étude

Les techniques de modélisation ainsi que les calculs associés utilisés par le modèle DST, un modèle de référence, sont exposés en détails. Le modèle DST permet la simulation relativement rapide d'un champ de puits géothermique par l'application d'hypothèses menant à une représentation axisymétrique du problème de transfert de chaleur dans le sol. Dans cette représentation simplifiée, les puits n'ont plus de position spatiale définie et sont utilisés afin de diviser le volume de sol attribuable à l'échangeur géothermique en une multitude de sous-volumes de sol sur lesquels agit le fluide circulant dans les puits de l'échangeur géothermique. La solution au problème de transfert de chaleur dans le sol est obtenue par la superposition de trois solutions partielles. Le modèle DST présente certaines limitations, dont le confinement à la modélisation de champs de puits où les puits sont distribués uniformément autour du centre du volume de stockage posé de forme cylindrique. De plus, le modèle DST est incapable de prédire la température du fluide à la sortie de chaque puits et de modéliser un échangeur géothermique considérant plus d'un débit et plus d'une température du fluide à son entrée, contrairement au modèle proposé où la température du fluide à la sortie de chaque puits est connue et où deux réseaux indépendants de puits (ou de tuyaux) peuvent être exploités. Le modèle DST présente également des discontinuités dans les résultats de température du fluide à la sortie du volume de stockage aux pas de temps "long" dt . Les méthodes de calcul de transfert de chaleur utilisées par le modèle DST sont responsables de ces discontinuités. Ces dernières indiquent une modélisation inadéquate du transfert de chaleur durant ces périodes.

Le modèle DST a été modifié dans le but d'étudier un nouveau concept de système d'échangeur géothermique formé de puits à double tubes en U fonctionnant de manière indépendante l'un de l'autre permettant de proposer une alternative aux systèmes de stockage à haute température

utilisant de larges surfaces de capteurs solaires. L'application du modèle DST modifié à un complexe résidentiel existant pour lequel un système à haute température a été mis en place permet de diminuer de 75 % la surface des capteurs solaires par l'ajout de pompes à chaleur et de passer à des pertes thermiques du volume de stockage de 61 % à 14 % puisque le système alternatif proposé opère à plus basse température. Le rendement des capteurs solaires est également augmenté, passant de 29 % à 58 % avec l'alternative proposée, par le fait d'une plus basse température d'alimentation. En revanche, la fraction solaire du système est réduite à 78 %, contre 90 % pour le système en place opérant à haute température.

Un nouveau modèle d'échangeur géothermique est proposé et implanté dans le programme de simulation TRNSYS. Le modèle proposé comble certaines des lacunes du modèle DST, dont celles énoncées plus haut. Le modèle proposé utilise la température moyenne du sol le long d'un puits, solution étant dérivée de l'équation de la ligne source finie, pour le calcul de la température du fluide à la sortie de chaque puits. Le modèle s'appuie également sur une technique d'agrégation des charges thermiques passées et sur le principe de superposition afin de tenir compte de l'historique thermique du sol et de l'interaction entre les puits. Une autre caractéristique d'importance majeure et nouvelle dans le domaine, est la possibilité de modéliser deux réseaux indépendants de puits ayant chacun son propre débit et sa propre température du fluide à son entrée. En terme pratique, cette nouvelle caractéristique permet par exemple de modéliser un champ de puits où un réseau de puits opère à la recharge thermique du volume de stockage, tandis que l'autre réseau est utilisé pour la climatisation de bâtiments en été. Le modèle proposé a été validé à l'aide de données expérimentales en provenance d'essais de réponse thermique à charge constante et à charge variable, ainsi que par le suivi d'un échangeur géothermique réel formé de trois puits. Il est à noter que le modèle proposé n'a pas été validé au niveau de la modélisation de l'interaction thermique entre les puits puisque dans le cas de l'échangeur géothermique réel formé de 3 puits, l'espacement entre les puits de 6.1 m est trop important pour la période et les charges thermiques considérées.

Une comparaison interlogicielle entre le modèle proposé et le modèle DST, pour un même champ de 19 puits à modéliser, montre une plus grande capacité du modèle proposé à échanger de la chaleur entre le fluide et le sol lors de l'augmentation de la variation de la dérivée de la température du fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique par rapport au temps. L'écart maximum entre les résultats de la température du fluide à la sortie de l'échangeur géothermique

passé d'environ 1 °C durant la 1^{ière} année à environ 3°C durant la 4^{ème} année et demeure stable durant le reste de la simulation d'une durée de 20 ans. Sur le plan du temps de calcul dans TRNSYS, la simulation du champ de 19 puits par le modèle DST est environ 15 fois plus rapide que par le modèle proposé.

Le modèle proposé est considéré plus exact que le modèle DST de part la méthode de calcul du transfert de chaleur par conduction dans le sol utilisée, c'est-à-dire que la méthode de la ligne source finie employée par le modèle proposé est considérée plus exacte que la méthode par différences finies employée par le modèle DST. Cependant, d'autres techniques de modélisation (par exemple, l'agrégation des charges thermiques, l'algorithme de convergence sur la charge thermique entre un puits et le sol et le transfert de chaleur à l'intérieur du puits) utilisées par le modèle proposé et par le modèle DST (par exemple, la simplification axisymétrique du champ de puits et la construction automatique des différents maillages) ne permettent pas d'affirmer avec certitude que les résultats du modèle proposé sont plus exacts que ceux du modèle DST pour un champ de puits uniformément répartis autour du centre du volume stockage.

6.8 Recommandations

Suivant les résultats obtenus et les caractéristiques des modèles étudiés, il est recommandé de privilégier l'utilisation du modèle proposé plutôt que du modèle DST. Pour les champs de puits à configuration hexagonale ou proche, où les puits sont répartis uniformément autour du centre du volume de stockage, le modèle DST peut être recommandé pour un dimensionnement initial dans l'objectif de guider le dimensionnement final à être réalisé avec le modèle proposé. De cette manière, les deux modèles peuvent être complémentaires en diminuant le temps de calcul et en améliorant l'exactitude des résultats.

Il est recommandé de poursuivre la validation du modèle proposé pour le cas d'un échangeur géothermique formé de plusieurs puits où l'interaction thermique entre les puits modifie de manière significative la température du fluide à la sortie de l'échangeur.

Dans l'objectif d'améliorer la capacité du modèle proposé à représenter les échanges thermiques dans un échangeur géothermique, il pourrait être envisagé de modéliser l'effet thermique de l'écoulement d'eau souterraine par l'application d'une certaine fonction aux points de calcul d'intérêt, comme il est fait dans le calcul de la propagation dans le sol de contaminants dissous par l'eau souterraine.

Il est finalement recommandé que chaque projet d'installation de systèmes géothermiques de nature commerciale ou institutionnelle face l'objet d'un dimensionnement passant par l'utilisation de logiciels spécialisés, tel que le modèle proposé, en raison de la complexité des interactions thermiques ayant lieu à l'intérieur d'un échangeur géothermique dont une sous-évaluation peut se traduire par des coûts supplémentaires importants.

BIBLIOGRAPHIE

- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2003). *ASHRAE handbook. Applications*. Atlanta, Ga.: American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers.
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (1986). *Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors*. American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Standard 93-1986.
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (1980). *Methods Of Testing To Determine The Thermal Performance Of Unglazed Flat-Plate Liquid-Type Solar Collectors*. American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Standard 96-1980.
- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2004). *Frozen ground engineering* (2^e éd.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Association canadienne de normalisation. (2003). *Conception et installation des systèmes d'énergie du sol*. Association canadienne de normalisation, CAN/CSA C448 Série-02.
- Atmospheric science data center. (2008). *Surface meteorology and Solar Energy*. Consulté le 4 mai 2009, tiré de <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>.
- Austin, W. A. (1998). *Development of an in situ system for measuring ground thermal properties*. M.Sc.A. inédit, Oklahoma State University, Stillwater (Oklahoma), États-Unis.
- Beier, R. A., & Smith, M. D. (2002). Borehole thermal resistance from line-source model of in-situ tests. *ASHRAE Transactions*, 108(2), 212-219.
- Bernier, M., & Langlois, A. (2009a). *Preliminary calculations regarding the borefield design at 70 Canuck avenue - Downsview park*. Confidential report. 9 pages.
- Bernier, M., Langlois, A., & Chapuis, S. (2009b). *Sizing and hourly simulations of the solar/geothermal borefield at 70 Canuck avenue - Downsview park*. Confidential report. 9 pages.

- Bernier, M., Kummert, M., & Bertagnolio, S. (2007). Development and application of test cases for comparing vertical ground heat exchanger models. *Proceedings of the 10th International Building Performance Simulation Association Conference*, (pp. 1462-1469).
- Bernier, M., & Salim Shirazi, A. (2007). Solar heat injection into boreholes: A preliminary analysis. *Proceedings of the 2nd Canadian Solar Buildings Conference*, (T1-1-1, 8 pages).
- Bernier, M. A. (2006). Closed-loop ground-coupled heat pump systems. *ASHRAE Journal*, 48(9), 12-19
- Bernier, M. A., Labib, R., Pinel, P., & Paillot, R. (2004). A Multiple load aggregation algorithm for annual hourly simulations of GCHP systems. *Int. J. of Heating, Ventilating, Air-Conditioning and Refrigeration Research*, 10(4), 471-487.
- Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids* (2^e éd.). Oxford: Clarendon Press.
- Chapuis, S., & Bernier, M. (2009). Seasonal storage of solar energy in borehole heat exchangers. *Proceedings of the 11th International Building Performance Simulation Association Conference*, (pp. 599-606).
- Claesson, J., Efring, B., Hellström, G., & Johansson, S. (1981). *Duct storage model cylindrical symmetry*. [Logiciel]. Lund (Suède): Dep. of mathematical and physics, Lund Institute of Technology.
- Costes, V., & Peysson, P. (2008). *Projet d'Initiation à la Recherche et au Développement - Capteurs géothermiques verticaux enterrés : Validation expérimentale de nouveaux modèles développés dans l'environnement TRNSYS*. Montréal. École polytechnique.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2006). *Solar engineering of thermal processes* (3^e éd.). Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- Eskilson, P. (1987). *Thermal analysis of heat extraction boreholes*. Ph. D. inédit, University of Lund (Suède), Suède.

- Eslami-nejad, P., Langlois, A., Bernier, M., Chapuis, S., & Faraj, W. (2009). Solar Heat Injection into Boreholes. *Proceedings of the 4th Annual Canadian Solar Buildings Conference*, (pp.237-246).
- Gehlin, S. (2002). *Thermal Response Test Method Development and Evaluation*. Ph. D. inédit, Lulea University of Technology, Lulea, Suède.
- GeoEnergy Solutions Inc. (2009). *Report on a geothermal energy test borehole and in-situ thermal conductivity test*. Confidential report. 7 pages.
- Golder Associés Lté. (2008). *Rapport de recherche - Évaluation in situ des propriétés thermiques de différents matériaux de remplissage de puits géothermiques*. Rapport confidentiel. 42 pages.
- Hadorn, J.-C., & Chuard, D. (1988). *Guide du stockage saisonnier de chaleur*. Zurich: Société suisse des ingénieurs et des architectes.
- Hellström, G. (1989). *Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code*. Lund: Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- Hellström, G. (1991). *Ground heat storage: Thermal analyses of duct storage systems. I. Theory*. Ph. D. inédit, University de Lund (Suède), Suède.
- IMLS. (1978). *ROUTINE DERFC*. [Code Fortran]. Consulté le 18 novembre 2009, tiré de http://ib.cnea.gov.ar/~fiscom/Libreria/imsi_old/derfc.f.
- Incropera, F. P. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6^e éd.). Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- Ingersoll, L. R., Zobel, O. J., & Ingersoll, A. C. (1948). *Heat conduction with engineering and geological applications*. New York: McGraw-Hill.
- Kavanaugh, S. P. (2000). Field tests for ground thermal properties--methods and impact on ground-source heat pump design. *ASHRAE Transactions*, 106(1), 851-855.
- Kavanaugh, S. P., & Rafferty, K. D., (1997). *Ground-source heat pumps : design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*. Atlanta: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

- Kelvin, W. T., Larmor, J., & Joule, J. P. (1882). *Mathematical and physical papers*. Cambridge,: University Press.
- Kersten, M. S. (1963). Thermal properties of frozen ground. *Proceedings, First International Conference on Permafrost*, Building Research Advisory Board. National Academy of Sciences – National Research Council, (pp.301-305).
- Klein, S. A., & al. (2004). *TRNSYS. Version 16.01.0002*. [Logiciel]. Madison, WI.: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- Lamarche, L., & Beauchamp, B. (2007). A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. *Energy and Buildings*, 39(2), 188-198.
- Lunardini, V. J. (1981). *Heat transfer in cold climates*. New York: Van Nostrand Reinhold Co.
- Lund, P. D., & Östman, M. B. (1985). A numerical model for seasonal storage of solar heat in the ground by vertical pipes. *Solar Energy*, 34(4-5), 351-366.
- Lundh, M., & Dalenbäck, J. O. (2008). Swedish solar heated residential area with seasonal storage in rock: Initial evaluation. *Renewable Energy*, 33(4), 703-711.
- Marcotte, D., Pasquier, P., Sheriff, F., & Bernier, M. (2010). The importance of axial effects for borehole design of geothermal heat-pump systems. *Renewable Energy*, 35(4), 763-770.
- Marcotte, D., & Pasquier, P. (2008). Fast fluid and ground temperature computation for geothermal ground-loop heat exchanger systems. *Geothermics*, 37(6), 651-665.
- Mattsson, N., Steinmann, G., & Laloui, L. (2008). Advanced compact device for the in situ determination of geothermal characteristics of soils. *Energy and Buildings*, 40(7), 1344-1352.
- Mazzarella, L. (1991). *MINSUN - A Revised IEA Computer Program for Performance Simulation of Energy Systems with Seasonal Thermal Energy Storage, Version 6.0*. [Logiciel].
- Mazzarella, L. (1989). *Duct storage model cylindrical symmetry. Révision*. [Logiciel], Milan (Italia): Dipartimento di energetica politecnico di Milano.
- Nordell, B., & Hellström, G. (2000). High temperature solar heated seasonal storage system for low temperature heating of buildings. *Solar Energy*, 69(6), 511-523.

- Nussbicker, J. (2009). *Solarunterstützte Nahwärmeversorgungen in Neckarsulm und Friedrichshafen*. Consulté le 10 janvier 2009, tiré de <http://www.itw.uni-stuttgart.de/abteilungen/rationelleEnergie/pdfdateien/09-02.pdf>
- Nussbicker, J., Mangold, D., Heidemann, W. H., & Mueller-Steinhagen, H. (2004). *Monitoring results and operational experiences for a central solar district heating system with borehole thermal energy store in neckarsulm (Germany)*. Consulté le 10 janvier 2009, tiré de http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/FINAL_PAPERS/6B-1.pdf
- Pahud, D. (2002). *Geothermal energy and heat storage*. Canobbio (Suisse): Scuola Universitaria professionale della Svizzera italiana, Dipartimento Costruzioni e Territorio, Laboratorio di Energia, Ecologica ed Economica. Consulté le 30 novembre 2009, tiré de [http://www.isaac.supsi.ch/isaac/pubblicazioni/Geotermia%20-%20Pompe%20di%20calore/Lecture%20notes/\(2002\)%20Geothermal%20energy%20and%20heat%20storage%20.%20Lecture%20notes/c-notes%20de%20cours%20-%20ch%201%20et%202.pdf](http://www.isaac.supsi.ch/isaac/pubblicazioni/Geotermia%20-%20Pompe%20di%20calore/Lecture%20notes/(2002)%20Geothermal%20energy%20and%20heat%20storage%20.%20Lecture%20notes/c-notes%20de%20cours%20-%20ch%201%20et%202.pdf)
- Pahud, D. (2000). Central solar heating plants with seasonal duct storage and short-term water storage: design guidelines obtained by dynamic system simulations. *Solar Energy*, 69(6), 495-509.
- Pahud, D. (1996). *Duct storage model cylindrical symmetry. Révision R.4*. [Logiciel]. Lausanne (Suisse): Laboratory of energy systems swiss federal institute of technology in Lausanne.
- Piessens, R. (non daté). *ROUTINE DQAG*. [Code Fortran]. Consulté le 29 novembre 2009, tiré de www.netlib.org/slatec/src/.
- Pitts, D. R., & Sissom, L. E. (1997). *Schaum's outline of theory and problems of heat transfer* (2^e éd.). New York: McGraw-Hill.
- Ressources naturelles Canada. (2005). Bulletin électronique de RNCan. Numéro 2, mai 2005. Consulté le 29 novembre 2009, tiré de <http://www.nrcan-rncan.gc.ca/com/elements/issues/02/index-fra.php>.
- Schmidt, T., Mangold, D., & Müller-Steinhagen, H. (2004). Central solar heating plants with seasonal storage in Germany. *Solar Energy*, 76(1-3), 165-174.

- Sheriff, F., & Bernier, M. (2008). Simulations de champs de puits géothermiques verticaux de charges thermiques différentes. *Proceedings of the 5th IBPSA – Canada Conference; ESIm 2008*, (pp.17-24).
- Sheriff, F. (2007). *Generation de facteurs de reponse pour champs de puits geothermiques verticaux*. M.Sc.A. inédit, Ecole Polytechnique, Montréal (Canada), Canada.
- Shonder, J. A., Baxter, V. D., Hughes, P. J., & Thornton, J. W. (2000). A comparison of vertical ground heat exchanger design software for commercial applications / Discussion. *ASHRAE Transactions*, 106(1), 831-842.
- Sibbitt, B., Onno, T., McClenahan, D., Thornton, J., Brunger, A., Kokko, J., et al. (2007). The Drake Landing Solar Community Project - Early Results. *Proceedings of the 4th Annual Canadian Solar Buildings Conference*, 9 pages
- Solar Rating and Certification Corporation. (2009). *Directory of SRCC certified solar collector ratings*. Cocoa, Fl. (US): Solar Rating and Certification Corporation.
- Spitler, J. D., Cullin J. R., Bernier, M., Kummert, M., Cui, P., Liu, X., Lee, E. & Fisher, D. E. (2009). Preliminary intermodel comparison of ground heat exchanger simulation models. *Proceedings of 11th International Conference on Thermal Energy Storage; Effstock 2009*, Stockholm, Sweden, paper #115, 8 pages.
- Sutton, M.G., Nutter, D. W. & Couvillion R. J. (2003). A Ground Resistance for Vertical Bore Heat Exchangers With Groundwater Flow. *Journal of Energy Ressources Technology*, 125, 183-189.
- TESS. (2004). *TESS Librairies. Version 2.03*. [Logiciel]. Madison, WI.: Thermal energy systems Specialists.
- Trillat-Berdal, V. (2006). *Intégration énergétique dans les bâtiments par l'utilisation combinée de l'énergie solaire et de la géothermie basse température*. Ph. D. inédit, Université de Savoie, Chambéry (Savoie), France.
- Trillat-Berdal, V., Souyri, B., & Fraisse, G. (2006). Experimental study of a ground-coupled heat pump combined with thermal solar collectors. *Energy and Buildings*, 38(12), 1477-1484.

- U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, & Farouki, O. T. (1981). *Thermal properties of soils*. New Hampshire: United States Army Corps of Engineers.
- Yavuzturk, C., & Spitler, J., D. (1999). A short time step response factor model for vertical ground-loop heat exchangers. *ASHRAE Transactions*, 105(2), 475-485.
- Yavuzturk, C., Chiasson A. D. & Nydahl, J. E. (2009). Simulation model for ground loop heat exchangers. *ASHRAE Transactions*, 115(2).
- Zeng, H. Y., Diao, N. R., & Fang, Z. H. (2002). A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers. *Heat Transfer - Asian Research*, 31(7), 558-567.

ANNEXE 1 – Références informatiques

Cette annexe présente la liste des dossiers électroniques accompagnant ce mémoire ainsi qu'une brève description de leur contenu.

Tableau A.1.1: Liste des documents électroniques joints à ce mémoire.

Dossier	Contenu
Type272	Code source du Type272 (modèle proposé) et routines associées. <i>Proforma</i> du Type272. Fichier <i>Dynamic Link Library</i> (.dll) relié au Type272, appelé par le programme TRNSYS.
DST modifié	Code source du Type257 (DST modifié) et routine associée. <i>Proforma</i> du Type257. Fichier <i>Dynamic Link Library</i> (.dll) relié au Type257, appelé par le programme TRNSYS.
Chapitre 5	Projets TRNSYS pour les cas no.1 à 3 du Chapitre 5 et pour la comparaison interlogicielle.
Chapitre 6	Projets TRNSYS pour les applications no.1 à 3 du Chapitre 6.
Annexe 3	Projet TRNSYS de l'Annexe 3.
Annexe 7	Projets TRNSYS de l'Annexe 7, cas no.4 à 7.

ANNEXE 2 – Organigramme des sous-routines du modèle DST

Cette annexe présente une description sommaire des différentes sous-routines formant la structure du code source du modèle DST.

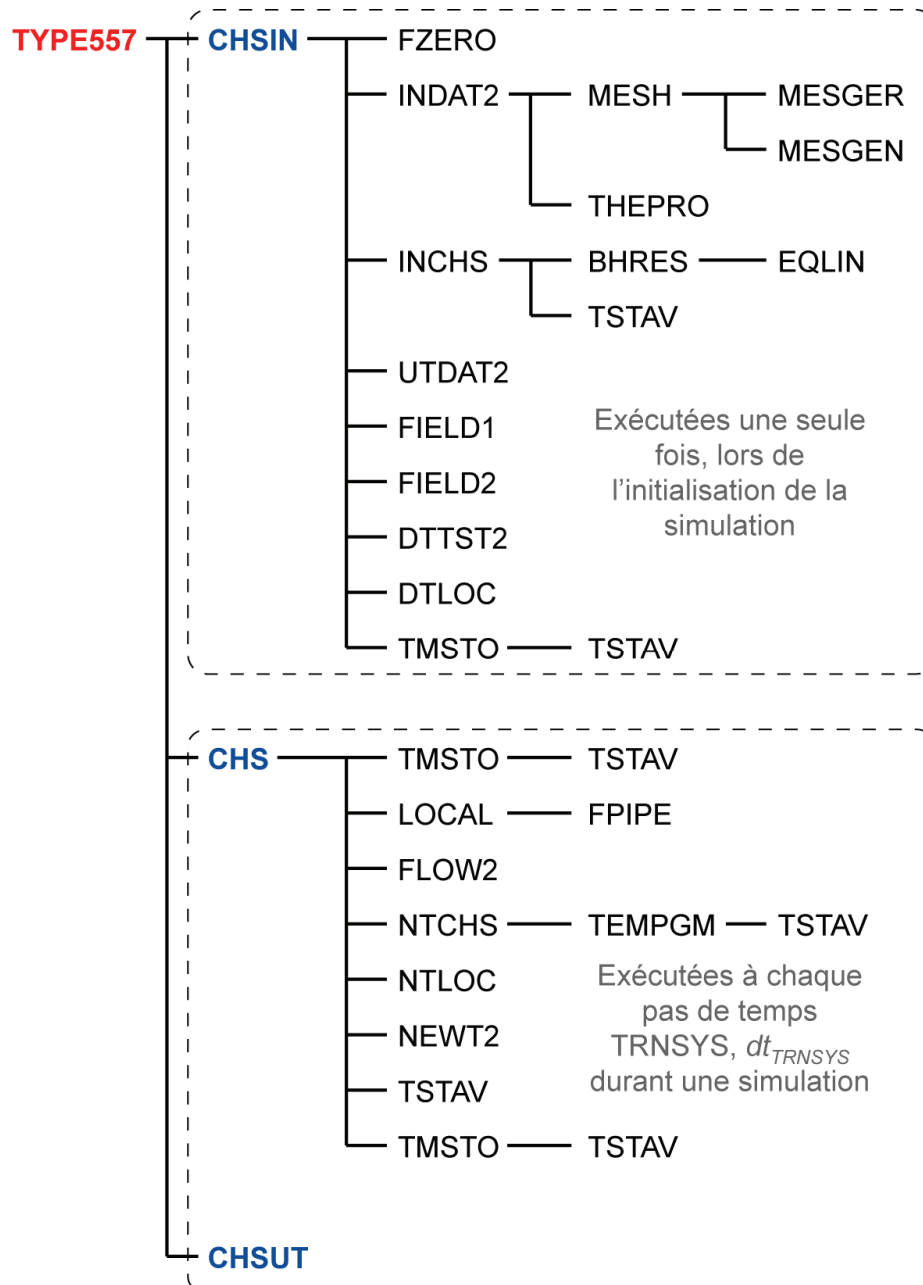


Figure A.2.1: Organigramme de la séquence d'appels des différentes sous-routines formant le modèle DST. La priorité est vers la droite, puis vers le bas.

Tableau A.2.1: Description sommaire des sous-routines du modèle DST selon l'ordre d'appel.

Routine	Description
TYPE557	Initialisation de la simulation. Lecture des paramètres. Lecture des données d'entrées et sortie des résultats au pas de temps TRNSYS, dt_{TRNSYS} .
CHSIN	Exécutée une seule fois, au début de la simulation. Initialisation de la simulation.
FZERO	Initialisation de variables à la valeur 0.
INDAT2	Génération des maillages <i>Local</i> , <i>Global</i> et <i>Subregion</i> . Application aux mailles <i>Global</i> de la condition initiale de température du sol avec effet du gradient thermique s'il y a lieu.
MESH	Génération des maillages <i>Local</i> , <i>Global</i> et <i>Subregion</i> . Calcul et attributions de propriétés physicothermiques aux mailles.
MESGER	Génération des régions radiales du maillage <i>Subregion</i>
MESGEN	Génération des maillages <i>Local</i> , <i>Global</i> et <i>Subregion</i> . Routine appelée à plusieurs reprises avec différents paramètres selon le maillage à générer.
THEPRO	Calcul et attributions de propriétés physicothermiques aux mailles.
INCHS	Calcul et attributions de propriétés physicothermiques aux mailles. Attribution de la longueur de puits par maillage <i>Local</i> , L_{Sub} .
BHRES	Calcul de la résistance thermique du puits sans l'effet de pont thermique relié à la présence de plusieurs tuyaux dans un puits, R_b^* . Calcul de l'effet de pont thermique relié à la présence de plusieurs tuyaux dans un puits R_a .
EQLIN	Calcul l'inverse de la matrice des résistances thermiques.
TSTAV	Calcul de la portion de la température des <i>Subregion</i> et de la température moyenne du volume de stockage attribuable aux mailles <i>Global</i> seulement.
UTDAT2	Écriture dans un fichier texte de différents paramètres de la simulation
FIELD1	Calcul de coefficients thermiques propres aux mailles <i>Local</i> et utilisés ultérieurement lors des calculs de transfert de chaleur. Application de la condition initiale de température égale à 0 °C aux mailles <i>Local</i> . Application de la condition frontière de taux de transfert de chaleur nul en r_1 aux maillages <i>Local</i> . Calculs du temps $t_{Fo=0.2}$.
FIELD2	Calcul de coefficients thermiques propres aux mailles du maillage <i>Global</i> et utilisés ultérieurement lors des calculs de transfert de chaleur. Application de la condition frontière de taux de transfert de chaleur nul aux limites du maillage <i>Global</i> (sauf sur le dessus où la condition frontière est de température).
DTTST2	Calcul du pas de temps dt utilisé dans le maillage <i>Global</i> .
DTLOC	Calcul du pas de temps dtr utilisé dans le maillage <i>Local</i> .

Tableau A.2.1: Description sommaire des sous-routines du modèle DST selon l'ordre d'appel (suite).

Routine	Description
CHS	Routine exécutée à chaque pas de temps TRNSYS, dt_{TRNSYS} . Sauvegarde de la valeur de certaines variables au pas de temps précédent. Calcul de la valeur de R_b si l'utilisateur désire tenir compte de l'effet de pont thermique entre les tuyaux, fonction du débit du fluide circulant dans l'échangeur géothermique. Sauvegarde de l'énergie échangée entre le fluide et le sol dans le temps. Soustraction d'énergie aux maillages <i>Local</i> selon le processus de transfert de chaleur entre les mailles <i>Local</i> et <i>Global</i> associées à la même <i>Subregion</i> , au pas de temps dt seulement.
TMSTO	Calcul de la portion de la température des <i>Subregion</i> et de la température moyenne du volume de stockage attribuable aux mailles <i>Local</i> seulement. Calcul de la température finale des <i>Subregion</i> et de la température moyenne du volume de stockage par l'addition des portions <i>Local</i> et <i>Global</i> .
LOCAL	Calculs effectués au pas de temps dtr . Calculs de coefficients thermiques utilisés lors des calculs de transfert de chaleur entre le fluide et le maillage <i>Local</i> . Calcul du transfert thermique entre le fluide et les maillages <i>Local</i> . Calcul de la température des mailles <i>Local</i> selon la méthode numérique de différences finies avant sous forme explicite. Calcul de l'énergie échangée entre le fluide et le sol.
FPIPE	Calculs effectués au pas de temps dtr . Calcul du transfert de chaleur entre le fluide et chaque maillage <i>Local</i> . Calcul de la température du fluide à la sortie de chaque maillage <i>Local</i> ou <i>Subregion</i> .
FLOW2	Calculs effectués au pas de temps dt seulement. Attribution de la condition frontière de température aux mailles <i>Global</i> à la surface du sol. Calcul du taux de transfert de chaleur entre chaque maille <i>Global</i> selon r et z , selon la température des mailles <i>Global</i> au pas de temps dt précédent.
NTCHS	Calculs effectués au pas de temps dt seulement. Calcul de la variation de température des mailles <i>Global</i> causée par le problème <i>Steady Flux</i> .
TEMPGM	Calculs effectués au pas de temps dt seulement. Calculs de coefficients thermiques utilisés dans le problème <i>Steady Flux</i> .
NTLOC	Calculs effectués au pas de temps dt seulement. Addition d'énergie au maillage <i>Global</i> selon le processus de transfert de chaleur entre les mailles <i>Local</i> et <i>Global</i> associées à la même <i>Subregion</i> .
NEWT2	Calculs effectués au pas de temps dt seulement. Calculs de la température des mailles <i>Global</i> selon la méthode numérique de différences finies avant sous forme explicite. Calcul des pertes/gains d'énergie par le dessus, le dessous et les côtés du volume de stockage.
CHSUT	Écriture dans un fichier texte de l'état thermique du système à chaque pas de temps dt_{TRNSYS} .

ANNEXE 3 – Modélisation par le modèle DST d'un échangeur géothermique formé de deux puits

Cette annexe présente le suivi des procédures réalisées par le modèle DST lors de la modélisation d'un échangeur géothermique formé de deux puits. Pour cet exemple, le pas de temps du *studio* TRNSYS, dt_{TRNSYS} a été fixé à 1 heure, pour une simulation d'une durée d'une année (8 760 heures). Les principaux paramètres et variables d'entrée au modèle DST pour cet exemple sont présentés au Tableau A.3.1.

Tableau A.3.1: Variables de l'onglet *Parameter* du *proforma* du Type557.

Parameters - Paramètres	Valeur	Unité
<i>Storage volume</i> - Volume de stockage (BTES)	2 770.88472	m ³
<i>Borehole depth</i> - Profondeur des puits	100	m
<i>Header depth</i> - Profondeur des têtes de puits	1	m
<i>Number of boreholes</i> - Nombre de puits	2	-
<i>Borehole radius</i> – Rayon d'un puits	0.1	m
<i>No. of Boreholes in series</i> - Nombre de puits en séries	2	-
<i>Number of radial regions</i> – Nombre. de régions radiales	2	-
<i>Number of vertical regions</i> – Nombre. de régions verticales	3	-
<i>Storage thermal conductivity</i> – Conductivité thermique du BTES	2	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
<i>Storage heat capacity</i> – Chaleur spécifique du BTES	2 000	kJ·m ³ ·K ⁻¹
<i>Negative of u-tube/bore</i> - Négatif du nbr. de tube en U/puits	-1	-
<i>Outer radius of u-tube pipe</i> – Rayon externe d'un tuyau	0.020	m
<i>Inner radius of u-tube pipe</i> – Rayon interne d'un tuyau	0.017	m
<i>Center-to-center half distance</i> – Demi-distance entre les tuyaux d'un tube en U, centre à centre	0.025	m
<i>Fill thermal conductivity</i> – Conductivité thermique du coulis	2	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
<i>Pipe thermal conductivity</i> – Conductivité thermique des tuyaux	0.4	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
<i>Gap thickness</i> – Espacement entre un tuyau et le sol	0	m
<i>Fluid specific heat</i> – Chaleur spécifique du fluide	4.190	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
<i>Fluid density</i> – Masse volumique du fluide	1 000	kg·m ⁻³
<i>Nombre of simulation years</i> – Nombre. d'années de simulation	1	-

Tableau A.3.1: Variables de l'onglet *Input* du *proforma* du Type557 (suite).

Inputs – Données d'entrée	Valeur	Unité
<i>Initial surface temperature</i> - température initiale de surface	10	°C
<i>Amplitude of air temperature</i> - Amplitude de la température de l'air	0	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
<i>Number of ground layers</i> – Nombre de couches de sol entourant le BTES	1	-
<i>Thermal conductivity of layer</i> – Conductivité thermique de la couche de sol entourant le BTES	2	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
<i>Heat capacity of layer</i> – Chaleur spécifique de la couche de sol entourant le BTES	2 000	kJ·m ³ ·K ⁻¹
<i>Thickness of layer</i> – Épaisseur de la couche de sol entourant le BTES	1 000	m

Tableau A.3.2: Variables de l'onglet *Input* du *proforma* du Type557.

Inputs – Données d'entrée	Valeur	Unité
<i>Inlet fluid temperature</i> - Temp. du fluide à l'entrée du BTES	60	°C
<i>Inlet flowrate (total)</i> - Débit massique total du fluide	800	kg·hr ⁻¹
<i>Temperature on top of storage</i> - Temp. sur le dessus du BTES	10	°C
<i>Air temperature</i> - Temp. de l'air ambiant	10	°C
<i>Circulation switch</i> – Sens de la circulation du fluide	1*	-

*1: du centre vers la périphérie du volume de stockage

Géométrie de l'échangeur géothermique

Le rayon de l'échangeur géothermique est donné par:

$$r_{BTES} = \sqrt{\frac{V_{BTES}}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{2\,770.88472}{\pi \cdot 100}} = 2.97 \text{ m}$$

Le rayon du volume de sol de forme cylindrique attribuable à chaque puits est donné par:

$$r_1 = \sqrt{\frac{V_{BTES}}{\pi \cdot H \cdot NBH_{tot}}} = \sqrt{\frac{2\,770.88472}{\pi \cdot 100 \cdot 2}} = 2.1 \text{ m}$$

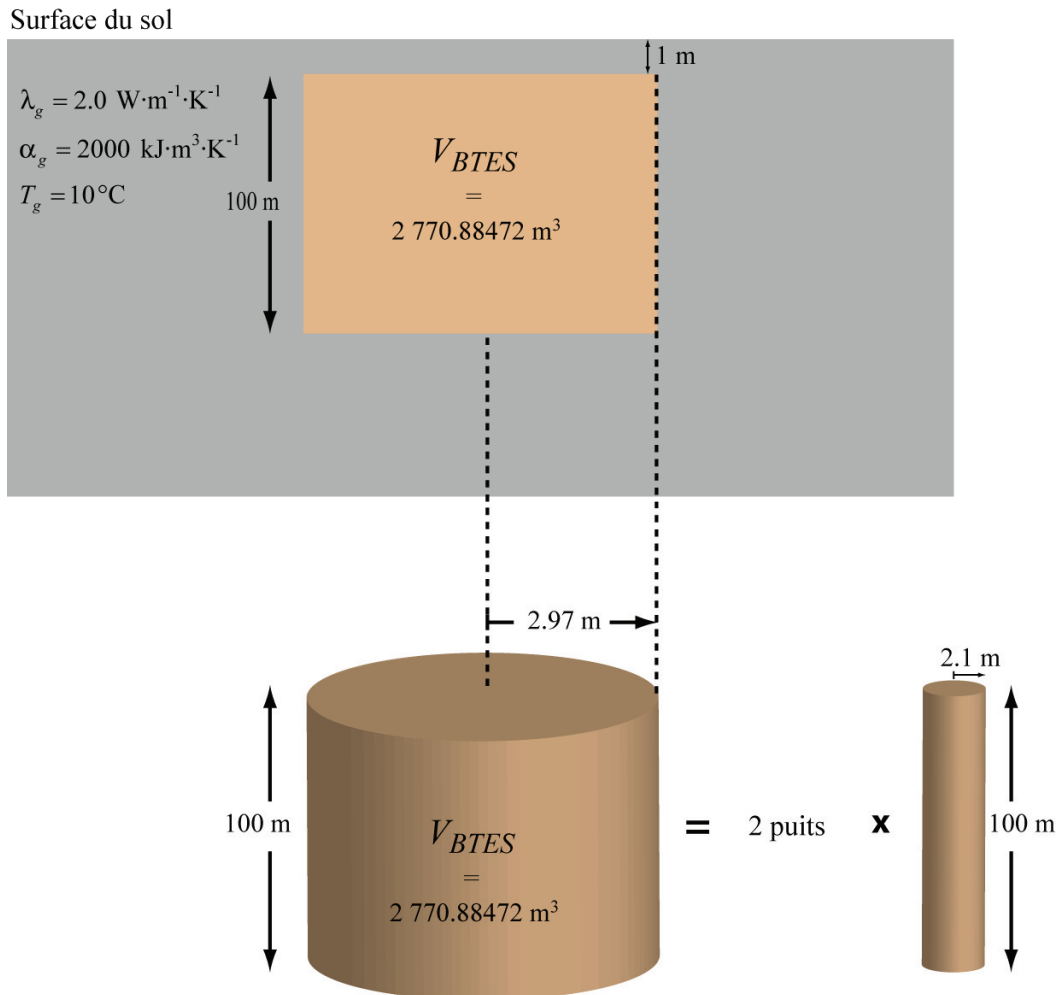


Figure A.3.1: Localisation de l'échangeur géothermique dans le sol et paramètres géométriques associés au volume de stockage.

Maillage *Subregion*

Puisque qu'il y a deux régions radiales et deux puits en séries par branche parallèle (une seule branche dans ce cas-ci), le modèle DST assigne un puits par région radiale. Le Tableau A.3.3 présente les bornes (selon r ou z) des régions radiales et verticales délimitant les six *Subregion* dans le maillage *Subregion*.

Tableau A.3.3: Bornes (selon r ou z) des régions radiales et verticales.

Région	no.	bornes (m)
Radiale	1	0.00 à 2.10
	2	2.10 à 2.97
Verticale	1	1.00 à 33.58
	2	33.58 à 68.42
	3	68.41 à 101.00

Chaque région radiale couvre une surface proportionnelle au nombre de puits qu'il lui a été attribué par le modèle DST, ainsi puisque les deux régions radiales ont le même nombre de puits attribués, alors:

$$A_{RR_1} = A_{RR_2} ; \pi(2.10^2 - 0.00^2) = \pi(2.97^2 - 2.10^2)$$

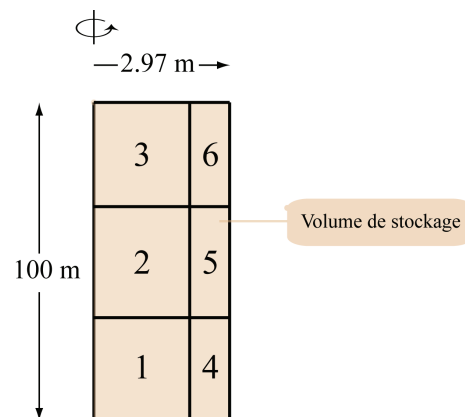


Figure A.3.2: Deux régions radiales et trois régions verticales formant un maillage *Subregion* à six *Subregion*. Pas à l'échelle.

Le fluide circule du centre vers la périphérie du volume de stockage et parcourt, dans l'ordre, les *Subregion* 1, 2, 3, 4, 5 et 6.

Maillage *Global*

Le Tableau A.3.4 présente les bornes des mailles *Global* (selon r ou z) dans le maillage *Global*.

Tableau A.3.4: Bornes des mailles *Global* (selon r ou z).

Maille <i>Global</i>	no.	bornes (m)
Radiale (<i>i</i>)	2	0.00 à 1.05
	3	1.05 à 2.10
	4	2.10 à 2.97
	5	2.97 à 3.99
	6	3.99 à 5.01
	7	5.01 à 7.04
	8	7.04 à 11.12
	9	11.12 à 19.26
	10	19.26 à 119.26
Verticale (<i>j</i>)	2	0.00 à 1.00
	3	1.00 à 2.02
	4	2.02 à 3.04
	5	3.04 à 5.07
	6	5.07 à 9.15
	7	9.15 à 17.29
	8	17.29 à 33.58
	9	33.58 à 51.00
	10	51.00 à 68.42
	11	68.42 à 84.71
	12	84.71 à 92.85
	13	92.85 à 96.93
	14	96.93 à 98.96
	15	98.96 à 99.98
	16	99.98 à 101.00
	17	101.00 à 102.02

Tableau A.3.4: Bornes des mailles Global (selon r ou z) (suite).

Maille <i>Global</i>	no.	bornes (m)
Verticale (<i>j</i>)	18	102.02 à 103.04
	19	103.04 à 105.07
	20	105.07 à 109.15
	21	109.15 à 117.29
	21	117.29 à 217.29

Les données du Tableau A.3.4 montrent que la dimension, selon l'axe r ou z, des deux premières mailles *Global* en dehors du volume de stockage est égale à :

$$2\sqrt{\alpha_g \cdot 72 \text{ heures} \cdot \frac{3600 \text{ secondes}}{\text{heures}}} = 2\sqrt{\frac{2}{2000000} \cdot 72 \cdot 3600} = 1.018 \text{ m}$$

et que l'espacement entre les mailles suivantes croît successivement d'un facteur 2, jusqu'à ce que le maillage atteigne une distance, par rapport au rayon ou à la base du volume de stockage, supérieure à:

$$2\sqrt{\alpha_g \cdot 8760 \text{ heures} \cdot \frac{3600 \text{ secondes}}{\text{heures}}} = 2\sqrt{\frac{2}{2000000} \cdot 8760 \cdot 3600} = 11.23 \text{ m}$$

Alors, la dernière maille se termine effectivement 100 m plus loin.

Les données présentées aux Tableaux A.3.3 et A.3.4 montrent également que les limites des mailles *Global* couvrant le volume de stockage n'entrecoupent pas les limites des *Subregion*.

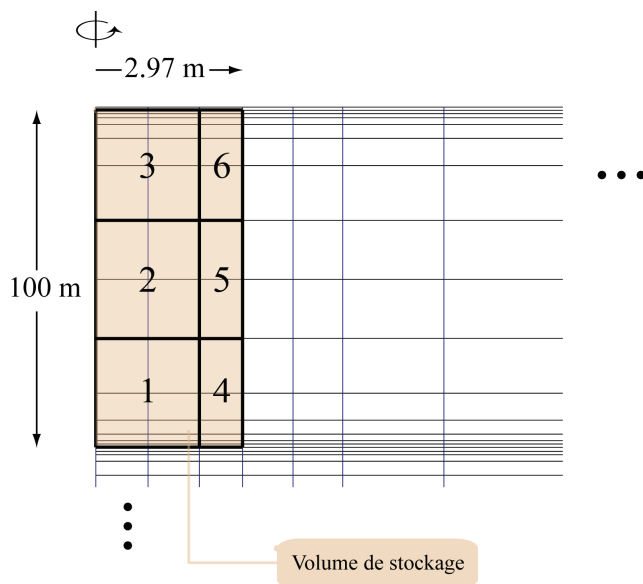


Figure A.3.3: Maillage *Global* et maillage *Subregion* superposés. Pas à l'échelle.

Le Tableau A.3.5 présente la longueur de puits, L_{Sub_k} attribuée à chaque *Subregion* et le nombre de mailles *Global* associées ("contenues") dans chaque *Subregion*.

Tableau A.3.5: Longueur de puits et nombre de mailles *Global* associées à chaque *Subregion*.

<i>Subregion</i> k	L_{Sub_k} (m)	Nombre de mailles <i>Global</i> associées
1	32.58	12
2	34.83	4
3	32.58	12
4	32.58	6
5	34.83	2
6	32.58	6

Maillage *Local*

À chaque *Subregion* est associé un maillage *Local*. Il y a donc six maillages *Local* dans cet exemple. Tous les maillages *Local* ont les mêmes dimensions de maille dont les bornes (selon r) sont présentées au Tableau A.3.6. Seule la longueur de puits, L_{Sub_k} parcourue par le fluide et utilisée dans le calcul de la condition frontière en r_1 pour chaque maillage *Local*, varie entre les maillages *Local*.

Tableau A.3.6: Bornes des mailles *Local* (selon r).

Maille <i>Local</i> i	bornes (m)
2	0.1 à 0.13
3	0.13 à 0.15
4	0.15 à 0.19
5	0.19 à 0.24
6	0.24 à 0.31
7	0.31 à 0.41
8	0.41 à 0.55
9	0.55 à 0.74
10	0.74 à 1.01
11	1.01 à 1.39
12	1.39 à 1.75
13	1.75 à 2.10

On peut vérifier, avec les données présentées aux Tableaux A.3.3 à A.3.6 et l'Équation 3.4, que le volume de sol couvert par chaque maillage *Local* k associé à une *Subregion* k , en tenant compte de la longueur de puits L_{Sub_k} , est le même que celui des mailles *Global* qui sont associées à la même *Subregion* k .

Calcul de la résistance thermique d'un puits

La valeur de la résistance thermique R_{p_i} entre le fluide et le coulis de remplissage à la paroi d'un tuyau est calculée sans la présence d'un espacement entre un tuyau et le coulis (*gap*) et est donnée par (voir l'Équation 3.9):

$$R_{p_i} = \frac{1}{5000 \cdot 2\pi \cdot 0.017} + \frac{1}{92.46 \cdot 0.652 \cdot \pi} + \frac{\ln(0.020/0.017)}{2\pi \cdot 0.40} + 0 = 0.07183 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$$

où la valeur de λ_f est calculé à partir de valeurs tabulées pour de l'eau à une température de 60 °C et la valeur du nombre de Nusselt, Nu est calculé par la formule de Gnielinski pour un écoulement turbulent (eau à 60 °C, 800 kg·hr⁻¹ dans un tuyau lisse de 0.034 m de diamètre).

La valeur des résistances thermiques R_{ij} est (voir Équation 3.11):

$$R_{11} = R_{22} = \frac{1}{2\pi \cdot 2.0} \left[\ln\left(\frac{0.1}{0.020}\right) - 0 \cdot \ln(1 - 0.25^2) \right] + 0.07183 = 0.199905$$

$$R_{12} = R_{21} = \frac{-1}{2\pi \cdot 2.0} [\ln(0.5) + 0 \cdot \ln(1 - 0.125)] = 0.0551589$$

La matrice inverse de la matrice des résistances est (voir Équations 3.12 et 3.13):

$$[\mathbf{R}]^{-1} = [\mathbf{J}] ; \begin{bmatrix} 0.199905 & 0.0551589 \\ 0.0551589 & 0.199905 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 5.4146 & -1.4940 \\ -1.4940 & 5.4146 \end{bmatrix}$$

La résistance thermique du puits sans l'effet de l'interaction thermique entre les tuyaux est (voir Équation 3.15):

$$R_b^* = R_{tot} = \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^N J_{ij} \right) \right)^{-1} = (5.4146 + 5.4146 - 1.4940 - 1.4940)^{-1} = 0.12753 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$$

Pour un tube en U, la résistance thermique R_a est (voir Équation 3.16):

$$R_a = \left[(1.4940) + \left(\frac{1}{5.4146 - 1.4940} + \frac{1}{5.4146 - 1.4940} \right)^{-1} \right]^{-1} = 0.28949 \text{ m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$$

La résistance thermique du puits avec interaction thermique entre les tuyaux est (voir Équation 3.18):

$$\eta = \frac{100}{4190 \cdot \frac{800}{3600} \cdot \sqrt{0.12753 \cdot 0.28949}} = 0.55895 \text{ (-)}$$

$$R_b = 0.12753 \cdot 0.55895 \cdot \coth(0.55895) = 0.14054 \text{ m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Calcul des pas de temps

1-Problème *Local*

Le Tableau A.3.7 présente les différentes valeurs utilisées dans l'Équation 3.5 menant au calcul du pas de temps court *dtr* appliqué aux calculs de transfert de chaleur dans les maillages *Local*.

Tableau A.3.7: Valeurs utilisées dans les calculs menant à la valeur du pas de temps *dtr*.

Maille <i>Local</i> <i>i</i>	$G_{Loc_k,i}$ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	$\left(G_{Loc_k,i} + G_{Loc_k,i+1} \right) \cdot \left(\rho c_p \pi \left(r_{Loc_k,i+1}^2 - r_{Loc_k,i}^2 \right) \right)^{-1}$ (s ⁻¹)
2	7.2890	1.8646·10 ⁻⁰³
3	61.0202	2.7405·10 ⁻⁰³
4	62.3380	1.5248·10 ⁻⁰³
5	55.2109	7.7723·10 ⁻⁰⁴
6	50.1153	3.9619·10 ⁻⁰⁴
7	46.4724	2.0198·10 ⁻⁰⁴
8	43.8682	1.0298·10 ⁻⁰⁴
9	42.0067	5.2512·10 ⁻⁰⁵
10	40.6764	2.6780·10 ⁻⁰⁵
11	39.7258	1.5084·10 ⁻⁰⁵
12	47.2688	1.5710·10 ⁻⁰⁵
13	62.0784	7.2843·10 ⁻⁰⁶
	maximum =	2.7405·10⁻⁰³

Ainsi, toujours selon l'Équation 3.5:

$$dtr_{MAX} = 364.89 \text{ secondes}$$

Finalement,

$$dtr = 3600 \cdot \left[\text{partie entière de} \left(\frac{3600}{364.89} \right) + 1 \right]^{-1} = 360 \text{ secondes}$$

2-Problème *Global*

La valeur du temps correspondant à $Fo = 0.2$, est:

$$t_{Fo=0.2} = \frac{0.2 \cdot Rl^2}{\alpha_g} = \frac{0.2 \cdot (2.1)^2}{\frac{2}{2000000}} = 882\,000 \text{ secondes} = 245 \text{ heures}$$

Pour cet exemple, le modèle DST calcule une valeur de dt correspondant à:

$$dt = \frac{t_{Fo=0.2}}{8} = 110\,250 \text{ secondes} = 30.625 \text{ heures}$$

Les équations menant à la fraction $\frac{t_{Fo=0.2}}{8}$ ne sont pas présentées dans ce mémoire, mais peuvent être retrouvées dans les routines FIELD2, DTTST2 et CHSIN (voir l'Annexe 2) du modèle DST.

Le premier échange de chaleur entre les maillages *Local* et le maillage *Global* a lieu à $t_{Fo=0.2} + dt$, soit à la $(245 + 30.625) \rightarrow 276^{\text{ième}}$ heure de la simulation.

Calcul de la température du fluide

La Figure A.3.4 présente la température du fluide circulant dans l'échangeur géothermique au temps correspondant à $t_{Fo=0.2} + dt$.

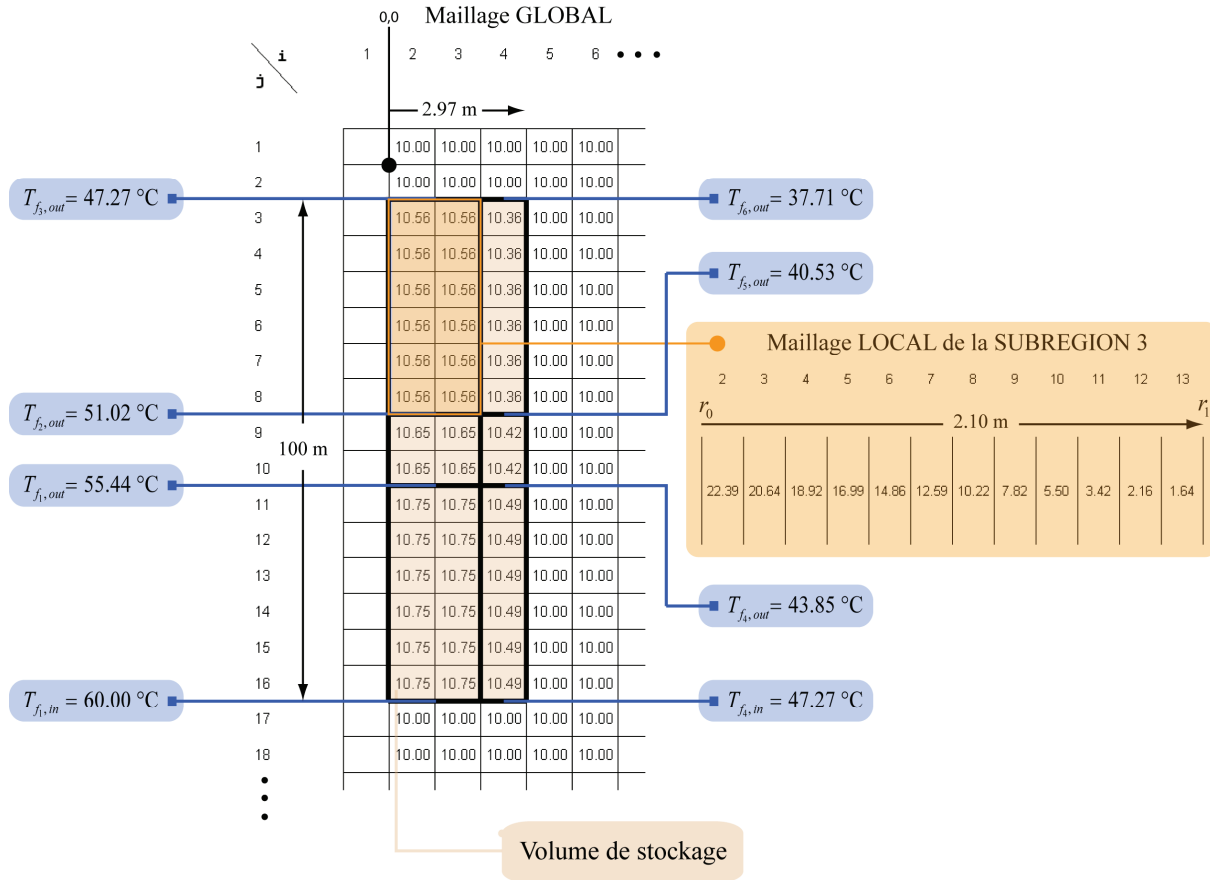


Figure A.3.4: Exemple de température du fluide circulant dans l'échangeur géothermique. Pas à l'échelle.

Par exemple, le calcul de la température du fluide à la sortie de la Subregion 3 est, selon l'Équation 3.20:

$$G_{Loc_2} = \frac{2\pi \cdot 2.0}{\ln\left(\frac{0.1129}{0.1}\right) + 0.14054 \cdot 2\pi \cdot 2.0} = 6.6575 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$T_{b_3} = \left(T_{Loc_2} + T_{Sub_3}\right) = 22.39 + 10.56 = 32.95 \text{ °C} \text{ et } \beta_3 = e^{\frac{32.58 \cdot 6.6575}{\frac{800}{3600} - 4190}} = 0.7922$$

$$T_{f_3, out} = 0.7922 \cdot 51.02 + (1 - 0.7922) \cdot (32.95) = 47.27 \text{ °C}$$

Ainsi, la condition frontière appliquée en r_0 au maillage *Local* 3, entre $t_{Fo=0.2} + dt$ et $t_{Fo=0.2} + dt + dtr$ est donnée par l'Équation 3.21:

$$q'_{Loc_3, r_0} = \frac{1}{32.58} \left(\frac{800}{3600} \cdot 4190 \right) (51.02 - 47.27) = 107.33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$$

Transfert de chaleur entre les maillages *Local* et *Global*

Tel que mentionné, le premier transfert de chaleur entre les mailles *Local* et *Global* a lieu à la 276^{ième} heure de la simulation dans TRNSYS. Cet échange de chaleur est illustré aux Figures A.3.5 et A.3.6 pour les mailles *Local* et *Global* associées aux Subregion 1 et 6, en exemple. Rappelons que les calculs de transfert de chaleur entre les mailles *Global* a lieu aux pas de temps dt subséquents puisque le modèle DST utilise la méthode de résolution par différences finies avant. Le transfert de chaleur entre les mailles *Local* et *Global* associées à la *Subregion* 1 se traduit par une chute de 0.75 °C de la température des mailles Local et une hausse de 0.75 °C de la température des mailles Global. Pour les mailles *Local* et *Global* associées à la *Subregion* 6, le transfert de chaleur se traduit par une variation de température de 0.36 °C de la température des mailles.

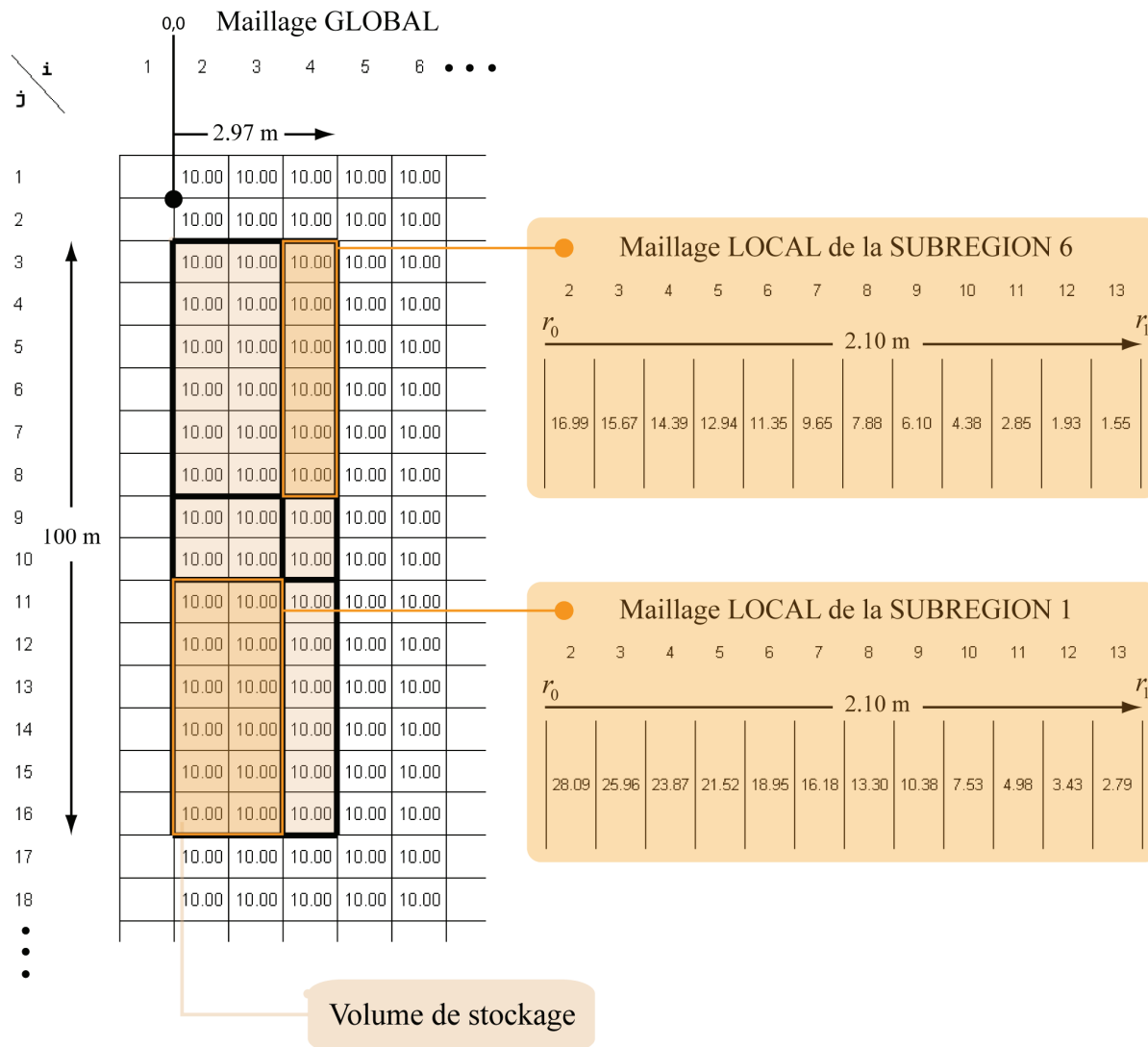


Figure A.3.5: Répartition de la température dans les mailles *Global* et *Local* au temps correspondant à $t_{Fo=0.2} + dt - dtr$. Pas à l'échelle.

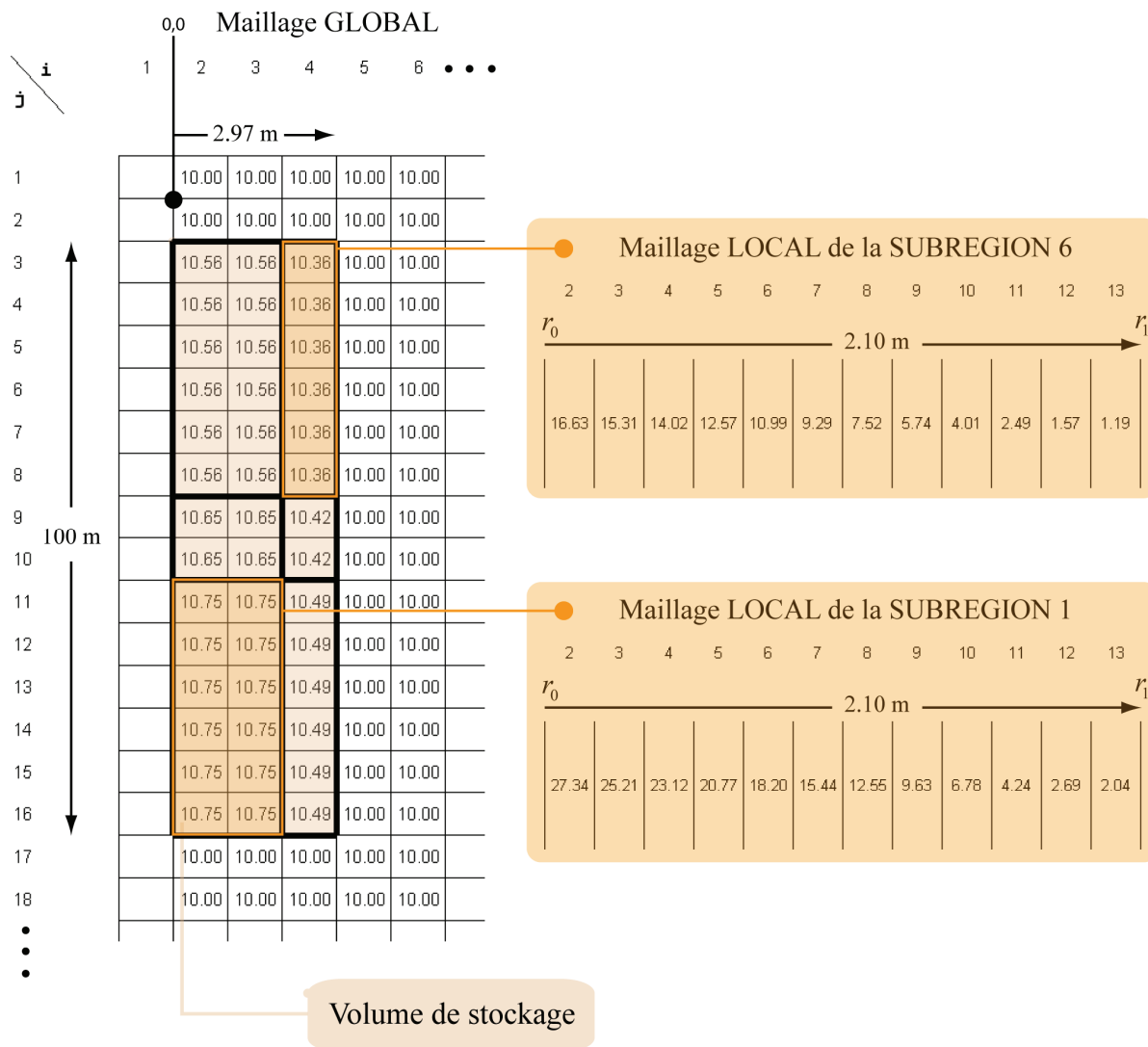


Figure A.3.6: Répartition de la température dans les mailles *Global* et *Local* au temps correspondant à $t_{Fo=0.2} + dt$. Pas à l'échelle.

ANNEXE 4 – Valeurs typiques de R_b^* , R_b et R_a selon la méthode de calcul du modèle DST

Les Tableaux A.4.1 à A.4.4 présentent des valeurs typiques de R_b^* , R_b et R_a pour différents cas. Dans tous les cas, l'épaisseur L_{gap} entre un tuyau et le coulis de remplissage est nulle et le fluide circulant dans les tuyaux est de l'eau à 20 °C (utilisé pour le calcul du coefficient de film, h par le modèle DST). Pour les cas à un tube en U, le débit massique de fluide est de 600 kg·hr⁻¹, tandis que pour les cas à deux tubes en U, le débit massique de fluide est de 1 200 kg·hr⁻¹ (c.-à-d. 600 kg·hr⁻¹ par tube en U). La diffusivité thermique du sol n'est pas utile puisque le modèle DST pose l'hypothèse d'un régime à l'état permanent pour le calcul des différentes résistances thermiques. Pour chaque cas, il y a trois valeurs de R_b calculées selon trois longueurs de puits données.

Tableau A.4.1: Valeurs de R_b^* , R_b et R_a , rayon externe d'un tuyau de 0.010 m et conductivité thermique du coulis et du sol de $2.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

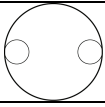
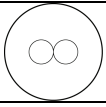
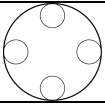
Paramètre	Cas no.1	Cas no.2	Cas no.3	Unité
Longueur du puits	50 150 250	50 150 250	50 150 250	m
Rayon du puits	0.05	0.05	0.05	m
Tube en U par puits	1	1	2	-
Rayon externe d'un tuyau	0.010	0.010	0.010	m
Rayon interne d'un tuyau	0.0075	0.0075	0.0075	m
Distance centre à centre entre les deux tuyaux d'un tube en U	0.080	0.020	0.080	m
Disposition des tuyaux				-
λ_p (tuyau)	0.40	0.40	0.40	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
λ_b (coulis)	2.0	2.0	2.0	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
λ_g (sol)	2.0	2.0	2.0	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
R_b^*	0.1071	0.1623	0.0487	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
R_a	0.5782	0.3575	0.2891	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
R_b	0.1101 0.1325 0.1725	0.1670 0.2032 0.2672	0.0501 0.0613 0.0810	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

Tableau A.4.2: Valeurs de R_b^* , R_b et R_a , rayon externe d'un tuyau de 0.010 m et conductivité thermique du coulis et du sol de $3.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

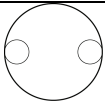
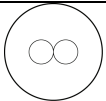
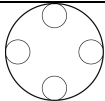
Paramètre	Cas no.4	Cas no.5	Cas no.6	Unité
Longueur du puits	50 150 250	50 150 250	50 150 250	m
Rayon du puits	0.05	0.05	0.05	m
Tube en U par puits	1	1	2	-
Rayon externe d'un tuyau	0.010	0.010	0.010	m
Rayon interne d'un tuyau	0.0075	0.0075	0.0075	m
Distance centre à centre entre les deux tuyaux d'un tube en U	0.080	0.020	0.080	m
Disposition des tuyaux				-
λ_p (tuyau)	0.40	0.40	0.40	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
λ_b (coulis)	3.0	3.0	3.0	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
λ_g (sol)	3.0	3.0	3.0	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
R_b^*	0.0920	0.1288	0.0427	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
R_a	0.4678	0.3207	0.2339	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
R_b	0.0956 0.1228 0.1692	0.1341 0.1735 0.2407	0.0445 0.0580 0.0809	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

Tableau A.4.3: Valeurs de R_b^* , R_b et R_a , rayon externe d'un tuyau de 0.016 m et conductivité thermique du coulis et du sol de $2.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

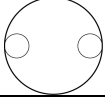
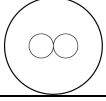
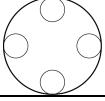
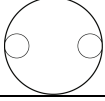
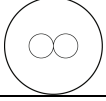
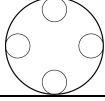
Paramètre	Cas no.7	Cas no.8	Cas no.9	Unité
Longueur du puits	50 150 250	50 150 250	50 150 250	m
Rayon du puits	0.05	0.05	0.05	m
Tube en U par puits	1	1	2	-
Rayon externe d'un tuyau	0.016	0.016	0.016	m
Rayon interne d'un tuyau	0.013	0.013	0.013	m
Distance centre à centre entre les deux tuyaux d'un tube en U	0.068	0.032	0.068	m
Disposition des tuyaux				-
λ_p (tuyau)	0.40	0.40	0.40	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
λ_b (coulis)	2.0	2.0	2.0	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
λ_g (sol)	2.0	2.0	2.0	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
R_b^*	0.0797	0.1097	0.0414	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
R_a	0.4166	0.2967	0.2083	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
R_b	0.0838 0.1136 0.1628	0.1153 0.1572 0.2261	0.0434 0.0584 0.0833	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

Tableau A.4.4: Valeurs de R_b^* , R_b et R_a , rayon externe d'un tuyau de 0.016 m et conductivité thermique du coulis et du sol de $3.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Paramètre	Cas no.10	Cas no.11	Cas no.112	Unité
Longueur du puits	50 150 250	50 150 250	50 150 250	m
Rayon du puits	0.05	0.05	0.05	m
Tube en U par puits	1	1	2	-
Rayon externe d'un tuyau	0.016	0.016	0.016	m
Rayon interne d'un tuyau	0.013	0.013	0.013	m
Distance centre à centre entre les deux tuyaux d'un tube en U	0.068	0.032	0.068	m
Disposition des tuyaux				-
λ_p (tuyau)	0.40	0.40	0.40	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
λ_b (coulis)	3.0	3.0	3.0	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
λ_g (sol)	3.0	3.0	3.0	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
R_b^*	0.0687	0.0887	0.0354	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
R_a	0.3399	0.2599	0.1699	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
R_b	0.0736 0.1089 0.1639	0.0951 0.1412 0.2129	0.0378 0.0555 0.0833	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$

ANNEXE 5 – Organigramme des sous-routines du Type272

Cette annexe présente une description sommaire des différentes sous-routines formant la structure du code source du Type272.

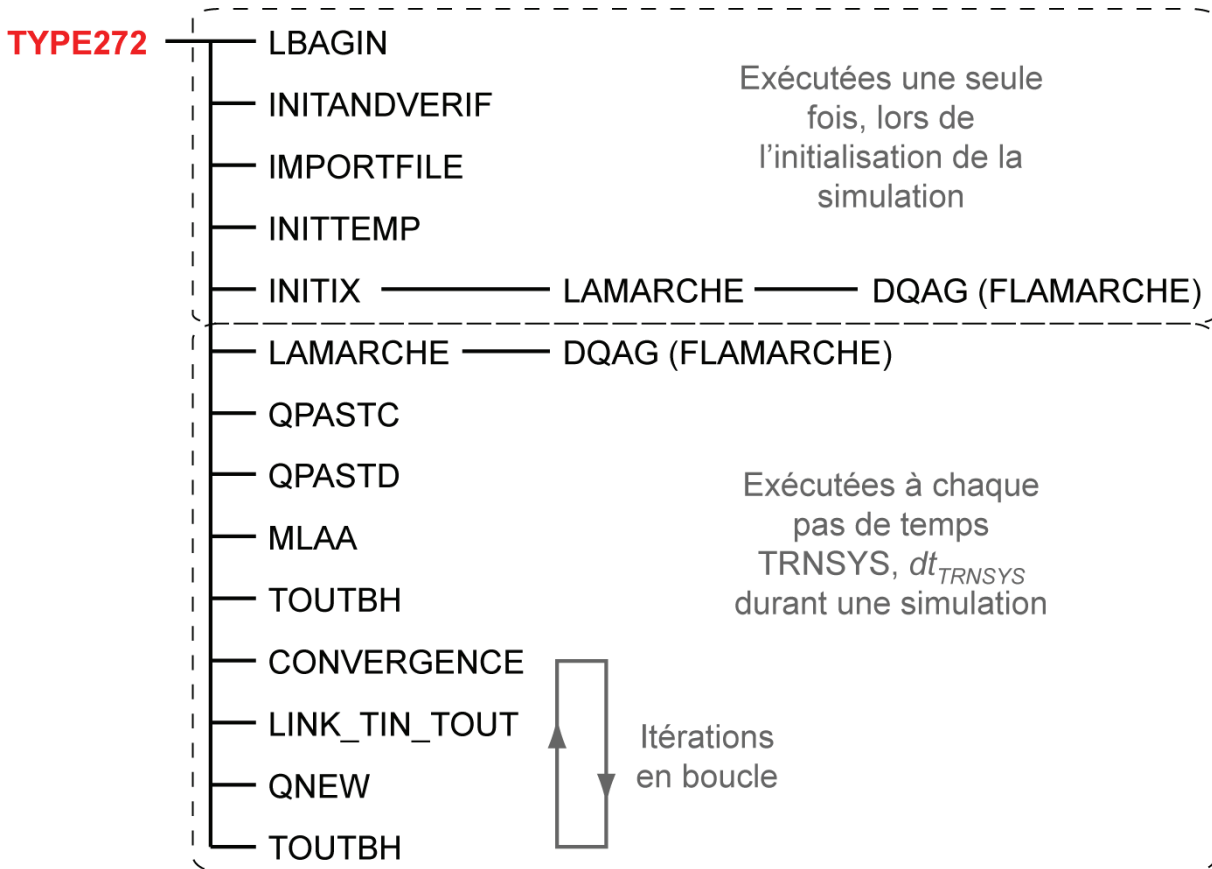


Figure A.5.1: Organigramme de la séquence d'appels des différentes sous-routines formant le Type272. La priorité est vers la droite, puis vers le bas.

Tableau A.5.1: Description sommaire des sous-routines du Type272 selon l'ordre d'appel.

Routine	Description
LBAGIN	Initialisation de variables à la valeur zéro.
INITANDVERIF	Vérification de la valeur de certains paramètres et émission de messages d'erreur le cas échéant.
IMPORTFILE	Lecture des positions des puits et des nœuds supplémentaires inscrits dans un fichier texte dont l'emplacement a été spécifié dans le <i>proforma</i> . Calcul de la distance entre chaque puits et entre les puits et les nœuds supplémentaires.
INITTEMP	Calcul de la $T_{g, moy}(t)$ sur une longueur de puits pour chaque pas de temps à effectuer.
INITIX	calcul des valeurs de la fonction $I(r, t)$ (Équation 4.4 ou 4.5) au rayon des puits et pour la distance entre chaque puits et entre chaque puits et chaque nœud supplémentaire et ce, pour l'ensemble des temps compris dans l'intervalle de temps immédiat Δt_h et pour les temps t_d, t_w, t_m auxquels débutent les intervalles correspondant $\Delta t_d, \Delta t_w, \Delta t_m$ tel que présenté à la Figure 4.3.
LAMARCHE	Calcul des bornes d'intégration de l'Équation 4.4 ou 4.5, selon le cas. Appel de DQAG.
DQAG	Résolution numérique de l'intégrale présentée à l'Équation 4.4 ou 4.5, selon le cas. Méthode de Gauss-Kronrod
FLAMARCHE	Calcul de l'intégrande de l'Équation 4.4 ou 4.5, selon le cas.
QPASTC	Réseau de puits no.1 (<i>Charge</i>). Assemblage des taux de transfert de chaleur passés entre chaque puits et le sol, pour la résolution du problème selon la méthode MLAA
QPASTD	Réseau de puits no.2 (<i>Discharge</i>). Assemblage des taux de transfert de chaleur passés entre chaque puits et le sol, pour la résolution du problème selon la méthode MLAA
MLAA	Calcul de l'Équation 4.8 et superposition de l'effet thermique pour l'ensemble des taux de transfert de chaleur passés entre chaque puits et le sol, selon la méthode MLAA, au rayon de chaque puits et en chaque nœud supplémentaire.
TOUTBH	Calcul de la température finale du sol au rayon de chaque puits et en chaque nœud supplémentaire pour la valeur du taux de transfert de chaleur (déterminé par méthode itérative) entre chaque puits et le sol au pas de temps présent. Calcul de la température du fluide à la sortie de chaque puits au pas de temps présent.
CONVERGENCE	Calcul du critère de convergence sur la température du fluide à la sortie de chaque puits permettant de sortir de la boucle d'itérations pour le pas de temps présent.
LINK_TIN_TOUT	Pose la température du fluide à la sortie d'un puits comme la température du fluide à l'entrée du puits suivant (pour chaque série de puits et pour chaque réseau de puits).
QNEW	Calcul de convergence sur le taux de transfert de chaleur au pas de temps présent entre chaque puits et le sol.

ANNEXE 6 – Guide d'utilisation du Type272

Cette annexe présente des explications concernant l'utilisation du Type272 sous TRNSYS. Les principaux paramètres limitant l'utilisation du Type272 (limitation sur la taille du fichier *Dynamic Link Library* (.dll) associé au Type272 dans TRNSYS) sont le nombre de puits et de nœuds supplémentaires et le nombre de pas de temps à être simulés. L'utilisateur ayant les connaissances appropriées en programmation en langage Fortran pour TRNSYS peut modifier la valeur de ces paramètres dans le code source selon l'objectif désiré.

La Figure A.6.1 montre le *proforma* associé au Type272 et les onglets contenant des variables à être spécifiées par l'utilisateur. La description des variables associées aux différents onglets est présentée dans les sections qui suivent.

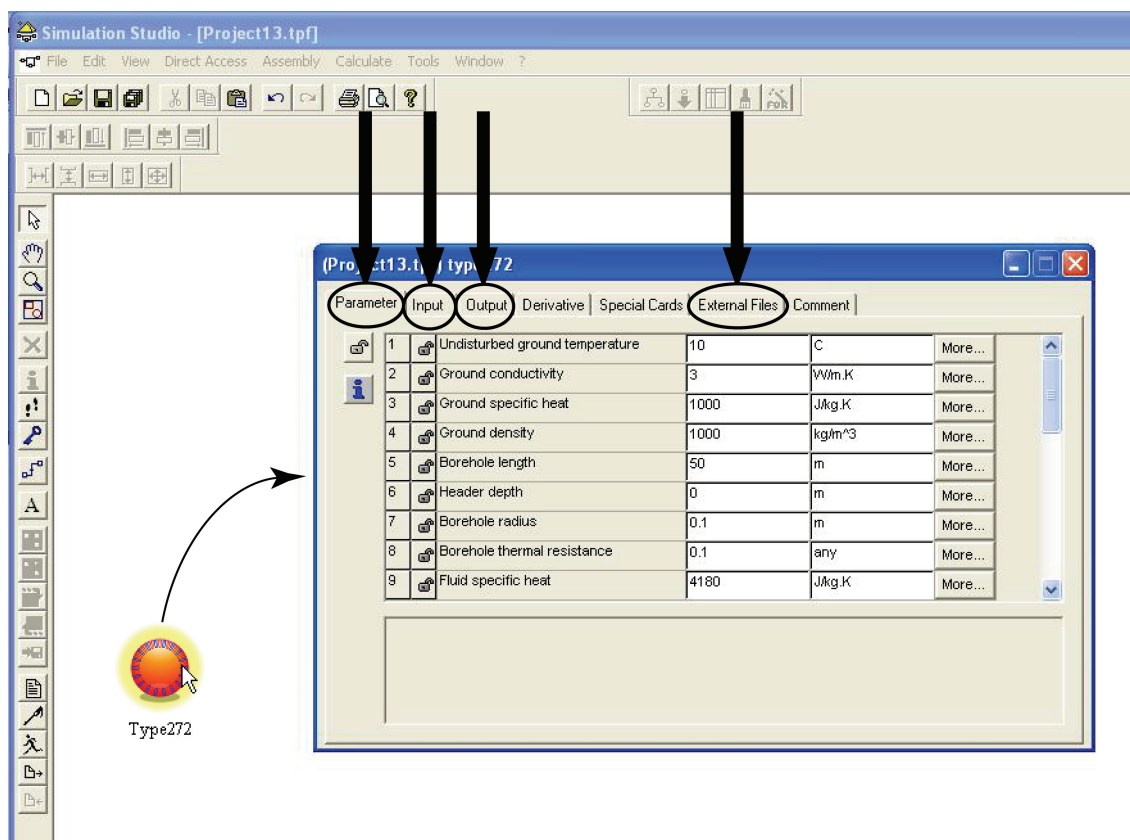


Figure A.6.1: Le *proforma* associé au Type272 dans le studio TRNSYS. Les onglets contenant des variables à être spécifiées par l'utilisateur sont encadrés.

Onglet *Parameter* du *proforma*

Le Tableau A.6.1 donne une description de l'ensemble des variables de l'onglet *Parameter* (voir la Figure A.6.1) à être spécifiées par l'utilisateur. Le Type272 permet de modéliser un réseau de puits ou deux réseaux indépendants de puits. Il est possible de modéliser un seul réseau de puits en fixant le nombre de puits de l'autre réseau à zéro (peu importe que ce soit le réseau de charge ou de décharge). Il est utile de rappeler que les appellations des réseaux de puits, soit *Charge* et *Discharge* ont simplement été choisies lors de la création du Type272 afin d'illustrer l'objectif initial du Type272, soit la modélisation d'un système de puits géothermique avec recharge solaire par deux réseaux indépendants de puits. Ces appellations ne limitent pas leur capacité à fonctionner avec des charges de chauffage ou de climatisation.

Tableau A.6.1: Variables de l'onglet *Parameter* du *proforma* du Type272 à être spécifiées par l'utilisateur.

Variable	Description	Unité
Undisturbed ground temperature*	Température non perturbée du sol	°C
Ground conductivity*	Conductivité thermique (effective ou non) du sol (entre le rayon d'un puits et le sol environnant, supposé homogène)	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Ground specific heat*	Chaleur spécifique du sol	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
Ground density*	Masse volumique du sol	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Borehole length*	Longueur d'un puits	m
Header depth*	Profondeur des têtes de puits depuis la surface du sol	m
Borehole radius*	Rayon d'un puits	m
Borehole thermal resistance*	Résistance thermique entre le fluide et la paroi du puits (suppose la paroi à température constante)	$\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
Fluid specific heat*	Chaleur spécifique du fluide circulant dans le puits	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
Half amplitude of the surface temperature variation*	Demi-amplitude annuelle de la variation de la température à la surface du sol	°C
Annual time-lag for surface temperature*	Nombre de jours entre le 1 ^{er} janvier et le jour le plus froid de l'année	jour

*Applicable à tous les puits, sans égard au réseau auquel ils sont associés

Tableau A.6.1: Variables de l'onglet *Parameter* du *proforma* du Type272 à être spécifiées par l'utilisateur (suite).

Variable	Description	Unité
Charge - Number of boreholes	Nombre de puits dans le réseau no.1	(-)
Charge - Number of borehole branches	Nombre de branches de puits en série dans le réseau no.1. Les branches sont toutes alimentées en parallèle.	
Charge - Number of boreholes in branch no 1 à X	Nombre de puits dans la branche no.X du réseau no.1	(-)
Charge - Total flow rate fraction in branch no 1 à X	Fraction du débit total circulant dans le réseau no.1 qui passe par la branche no.X	
Discharge - Number of boreholes	Nombre de puits dans le réseau no.2	(-)
Discharge - Number of borehole branches	Nombre de branches de puits en série dans le réseau no.2. Les branches sont toutes alimentées en parallèle.	
Discharge - Number of boreholes in branch no 1 à X	Nombre de puits dans la branche no.X du réseau no.2	(-)
Discharge - Total flow rate fraction in branch no 1 à X	Fraction du débit total circulant dans le réseau no.2 qui passe par la branche no.X	
MLAA - Number of time steps not aggregated*	Nombre de pas de temps non agrégés selon la méthode MLAA.	(-)
MLAA - 1st period of aggregation*	Nombre de pas de temps agrégés après la période non agrégée, selon la méthode MLAA.	(-)
MLAA - 2nd period of aggregations*	Nombre de pas de temps agrégés après la première période d'agrégation, selon la méthode MLAA.	(-)
MLAA - 3rd period of aggregation*	Nombre de pas de temps agrégés après la deuxième période d'agrégation, selon la méthode MLAA.	(-)

*Applicable à tous les puits, sans égard au réseau auquel ils sont associés

Tableau A.6.1: Variables de l'onglet *Parameter* du *proforma* du Type272 à être spécifiées par l'utilisateur (suite).

Variable	Description	Unité
Number of boreholes outputs	Nombre X de puits pour lesquelles on désire connaître la température du fluide à la sortie du puits ou la température du sol au rayon du puits.	(-)
Type of borehole output	Si 0 alors température du fluide à la sortie du puits. Si 1 alors température au rayon du puits (moyenne sur la longueur du puits).	
Borehole chosen as output number - 1 à X	Numéro du puits (voir section traitant de l'onglet <i>External Files</i> du <i>proforma</i>)	
Number of additional nodes temperature output	Nombre X de points autres que ceux situés au rayon des puits pour lesquelles on désire connaître la température (moyenne sur la hauteur d'un puits). Ces X points doivent se retrouver dans le fichier <i>Input File</i> (voir section traitant de l'onglet <i>External Files</i> du <i>proforma</i>)	(-)
Unit number for input file	Paramètre utilisé par TRNSYS pour retrouver le chemin du fichier spécifié dans l'onglet <i>External Files</i> , ne pas faire varier la valeur de ce paramètre normalement	(-)

*Applicable à tous les puits, sans égard au réseau auquel ils sont associés

Onglet *Input*

Le Tableau A.6.2 donne une description de l'ensemble des variables de l'onglet *Input* (voir Figure A.6.1) à être spécifiées par l'utilisateur. Si le nombre de puits d'un des deux réseaux de puits a été fixé à zéro par l'utilisateur, le Type272 ne tiendra pas compte des valeurs des variables associées à ce réseau dans l'onglet *Input* du *proforma*.

Tableau A.6.2: Variables de l'onglet *Input* du *proforma* du Type272 à être spécifiées par l'utilisateur.

Variable	Description	Unité
Charge - Borefield inlet temperature	Température du fluide à l'entrée du réseau no.1	°C
Charge - Total fluid flow rate	Débit du fluide à l'entrée du réseau no.1	kg·hr ⁻¹
Discharge - Borefield inlet temperature	Température du fluide à l'entrée du réseau no.2	°C
Discharge - Total fluid flow rate	Débit du fluide à l'entrée du réseau no.2	kg·hr ⁻¹

Onglet *Output*

Le Tableau A.6.3 donne une description de l'ensemble des variables de l'onglet *Output* (voir la Figure A.6.1), soit les variables de sortie du Type272 durant une simulation.

Tableau A.6.3: Variables de l'onglet *Output* du *proforma* du Type272 à être spécifiées par l'utilisateur.

Variable	Description	Unité
Borehole output no -1 à X	Température du fluide à la sortie du puits ou température au rayon du puits (moyenne sur la longueur du puits) selon le paramètre associé.	°C
Node output no - 1 à X	Température moyenne du sol sur la longueur d'un puits en ce point	°C
Charge - Fluid outlet temperature branch no - 1 à X	Température du fluide à la sortie de la branche no. X du réseau no.1	°C
Charge - Total fluid outlet temperature	Température du fluide à la sortie du réseau no.1	°C
Charge - Heat transfer rate branch no - 1 à X	Taux de transfert de chaleur de la branche no. X du réseau no.1	W
Charge - Total heat transfer rate	Taux de transfert de chaleur du réseau no.1	W
Charge - Total fluid flow rate	Débit du fluide à la sortie du réseau no.1	kg·hr ⁻¹
Discharge - Fluid outlet temperature branch no - 1 à X	Température du fluide à la sortie de la branche no. X du réseau no.2	°C
Discharge - Total fluid outlet temperature	Température du fluide à la sortie du réseau no.2	°C
Discharge - Heat transfer rate branch no - 1 à X	Taux de transfert de chaleur de la branche no. X du réseau no.2	W
Discharge - Total heat transfer rate	Taux de transfert de chaleur du réseau no.2	W
Discharge - Total fluid flow rate	Débit du fluide à l'entrée du réseau no.2	kg·hr ⁻¹

Onglet *External Files*

Les coordonnées des puits pour chaque réseau, ainsi que les nœuds supplémentaires où l'utilisateur désire connaître la température du sol (moyenne sur la longueur d'un puits) doivent être entrées dans un fichier en format texte (.txt). L'emplacement de ce fichier texte doit être indiqué dans l'onglet *External Files*. L'ordre d'apparition des puits et des nœuds dans le fichier texte doit être: puits du réseau de charge, puits du réseau de décharge et nœuds supplémentaires. La Figure A.6.2 montre un exemple de fichier de coordonnées de puits et de nœuds supplémentaires. Ce fichier contient les coordonnées du centre de 9 puits dans le réseau de charge (réseau no.1), du centre de 16 puits dans le réseau de décharge (réseau no.2) et de 3 nœuds supplémentaires. Les coordonnées sont en mètres. L'ordre des branches de puits en série doit suivre l'ordre des puits. Par exemple, pour ce cas, si le réseau de charge contient deux branches de puits en série, la première de quatre puits et la seconde de cinq puits, alors les puits no.1 à 4 sont dans l'ordre les puits de la première branche et les puits no.5 à 9 sont dans l'ordre les puits de la seconde branche (autrement dit, les puits no.1 et 5 ont la même température du fluide à leur entrée, soit la température du fluide à l'entrée du réseau de charge, et les puits no.4 et 9 sont les puits en fin de branche)

Fichier	Edition	Format	Affichage	?
8.0	8.0			
16.0	8.0			
24.0	8.0			
8.0	16.0			
16.0	16.0			
24.0	16.0			
8.0	24.0			
16.0	24.0			
24.0	24.0			
0.0	0.0			
8.0	0.0			
16.0	0.0			
24.0	0.0			
32.0	0.0			
0.0	8.0			
32.0	8.0			
0.0	16.0			
32.0	16.0			
0.0	24.0			
32.0	24.0			
0.0	32.0			
8.0	32.0			
16.0	32.0			
24.0	32.0			
32.0	32.0			
4.0	4.0			
4.0	8.0			
4.0	12.0			

Figure A.6.2: Exemple de fichier texte contenant les coordonnées en mètres du centre des puits et des nœuds supplémentaires pour un projet particulier (projet Downsview).

ANNEXE 7 – Autres validations du Type272

1) Cas no.4 – Essai de réponse thermique à charge constante – 1 puits

Le cas no.4 est le test de réponse thermique *Lincoln, Nebraska* tiré de Yavuzturk et al. (2009).

Tableau A.7.1: Synthèse des données utilisées pour valider les résultats du Type272.

Paramètre	Valeur	Unité
Longueur du puits*	74.7	m
Rayon du puits*	0.054	m
Température non perturbée du sol*	12.8	°C
Diffusivité thermique du sol*	$1.265 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Débit moyen du fluide*	0.168	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Chaleur spécifique du fluide (eau)***	4 850	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Puissance moyenne de chauffage*	2 490	W
Conductivité thermique effective**	2.64	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Résistance thermique du puits**	0.105	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

*Valeur tirée telle quelle de du cas no.4, **Valeur calculée, ***Valeur estimée

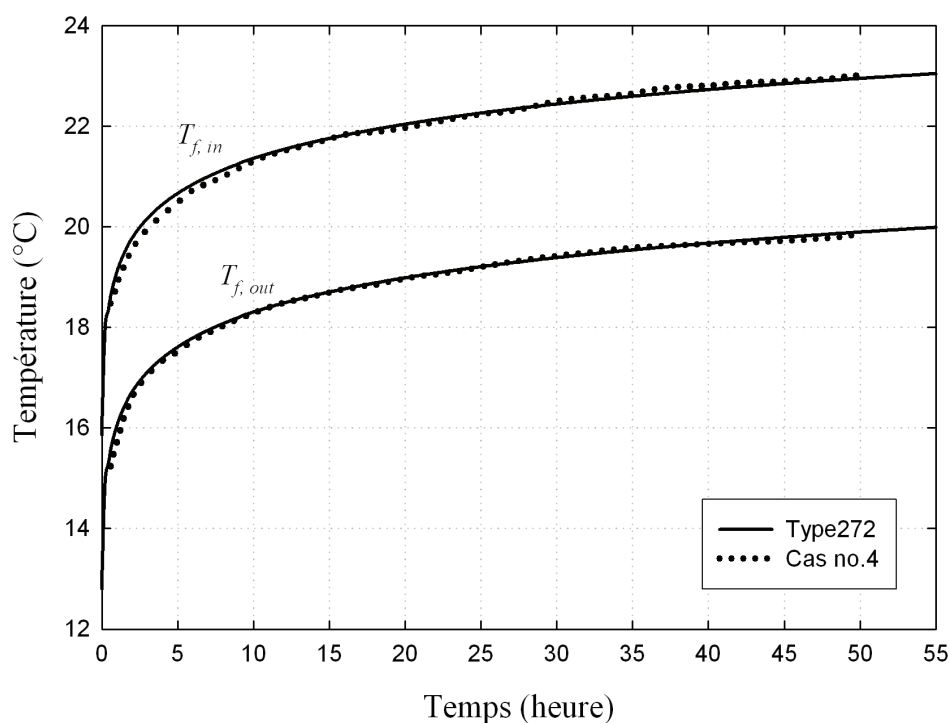


Figure A.7.1: Température du fluide pour le cas no.4 et selon le Type272.

2) Cas no.5 – Essai de réponse thermique à charge constante – 1 puits

Le cas no.5 est le test de réponse thermique *Site A #1 on 6-2-97* tiré de Austin (1998).

Tableau A.7.2: Synthèse des données utilisées pour valider les résultats du Type272.

Paramètre	Valeur	Unité
Longueur du puits*	75	m
Rayon du puits*	0.045	m
Température non perturbée du sol*	17.28	°C
Diffusivité thermique du sol***	$1.00 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Débit moyen du fluide*	0.189	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Chaleur spécifique du fluide (eau)***	4 200	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Puissance moyenne de chauffage*	3178	W
Conductivité thermique effective**	2.39	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Résistance thermique du puits**	0.191	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

*Valeur tirée telle quelle de du cas no.6, **Valeur calculée, ***Valeur estimée

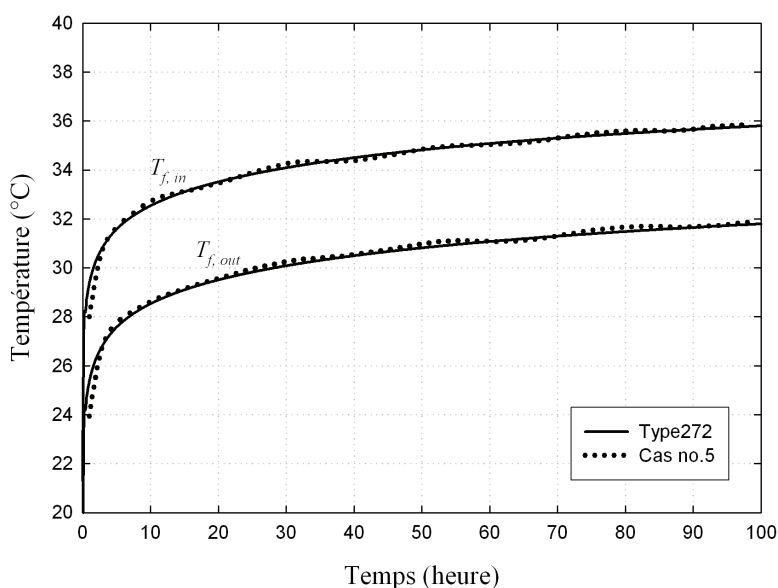


Figure A.7.2: Température du fluide pour le cas no.5 et selon le Type272.

Tableau A.7.3:

Écart calculé à partir de données numériques fournies dans la source du cas no.5 et les résultats du Type272 (Type272 – cas no.5).

Temps	Écart sur $T_{f,in}$	Écart sur $T_{f,out}$
heures	°C	°C
1	-1.49	-1.54
10	0.05	0.06
20	0.07	0.08
30	0.11	0.17
40	-0.07	-0.01
50	0.00	0.12
60	-0.09	-0.03
70	-0.03	0.03
80	0.29	0.18
90	-0.04	-0.04
RMS	0.048	0.050

3) Cas no.6 – Essai de réponse thermique à charge constante – 1 puits

Le cas no.6 est le test de réponse thermique *Dhahran, Saudi Arabia* tiré de Sharqawy et al. (2009).

Tableau A.7.4: Synthèse des données utilisées pour valider les résultats du Type272.

Paramètre	Valeur	Unité
Longueur du puits*	80	m
Rayon du puits*	0.1	m
Température non perturbée du sol*	32.5	°C
Diffusivité thermique du sol***	$1.20 \cdot 10^{-6}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Débit moyen du fluide*	0.111	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Chaleur spécifique du fluide (eau)***	3 800	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Puissance moyenne de chauffage*	1 430	W
Conductivité thermique effective**	3.38	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Résistance thermique du puits**	0.301	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

*Valeur tirée telle quelle du cas no.6, **Valeur calculée, ***Valeur estimée

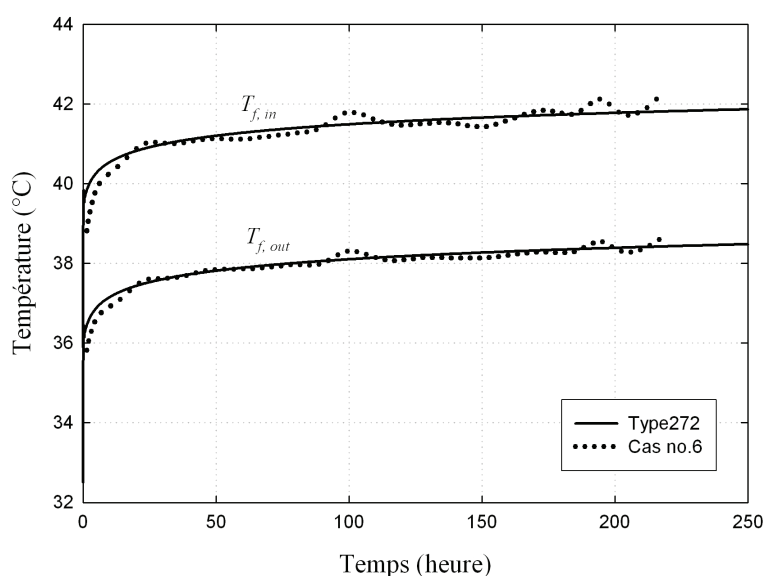


Figure A.7.3: Température du fluide pour le cas no.6 et selon le Type272.

Il est à noter que les données graphiques de température du fluide à l'entrée et à la sortie du puits tirées de l'article semblent avoir été influencées de manière significative par la température extérieure (voir Sharqawy et al. (2009)).

4) Cas no.7 – Essai de réponse thermique à charge constante – 1 puits

Le cas no.7 est le test de réponse thermique *Geneva, Switzerland* tiré de Mattsson et al. (2007).

Tableau A.7.5: Synthèse des données utilisées pour valider les résultats du Type272.

Paramètre	Valeur	Unité
Longueur du puits*	148	m
Rayon du puits*	0.0722	m
Température non perturbée du sol*	13.6	°C
Diffusivité thermique du sol***	$8.00 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
Débit moyen du fluide*	0.331	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Chaleur spécifique du fluide (eau)***	4 140	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
Puissance moyenne de chauffage*	6 000	W
Conductivité thermique effective**	2.06	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Résistance thermique du puits**	0.084	$\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

*Valeur tirée telle quelle de du cas no.7, **Valeur calculée, ***Valeur estimée

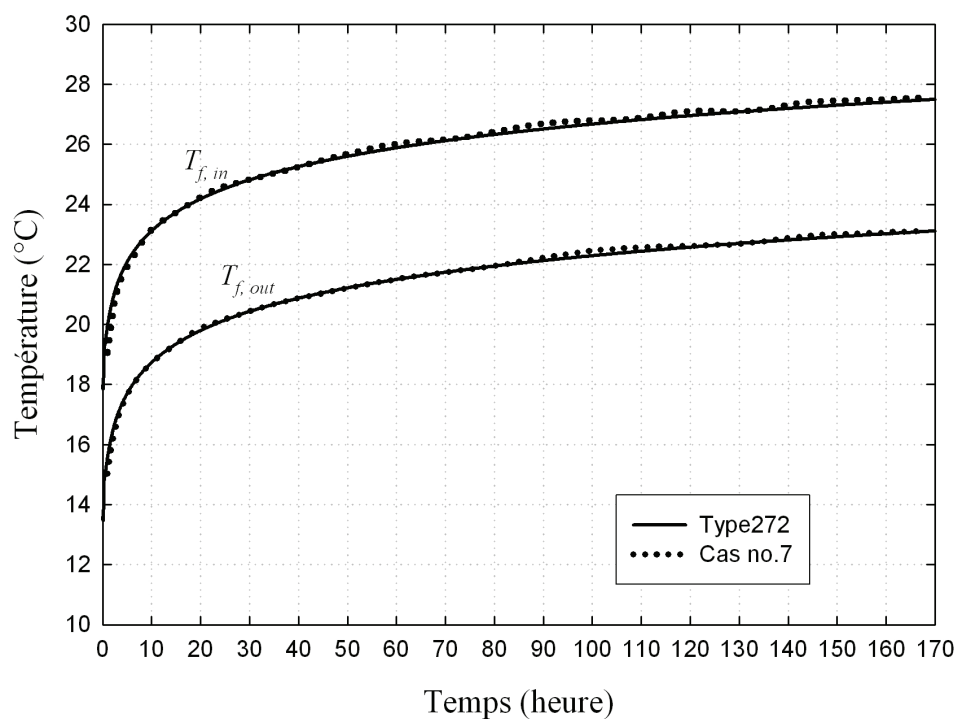


Figure A.7.4: Température du fluide pour le cas no.7 et selon le Type272.

ANNEXE 8 – Effet de la variation de la diffusivité thermique – Type272

Cette annexe présente l'effet de la variation de la diffusivité thermique du sol, α_g sur la température du fluide à l'entrée et à la sortie d'un puits selon le Type272 pour le cas no.7 de l'Annexe 7, soit l'essai de réponse thermique *Geneva, Switzerland* tiré de Mattsson et al. (2007). Tel que mentionné à la section 2.1.1, la diffusivité thermique du sol est un paramètre généralement estimé suite à l'observation de la composition des unités géologiques traversées lors du forage du puits géothermique. La diffusivité thermique est utilisée dans les calculs de transfert de chaleur en régime transitoire (voir l'Équation 4.4 ou 4.5). Également, selon l'Équation 2.5, un changement à la valeur de α_g implique un changement de la valeur de la résistance thermique du puits, R_b donc un comportement différent de l'évolution de la température du fluide circulant dans un puits. La Figure A.8.1 présente les résultats du Type272 pour le cas no.7 de l'Annexe 7 pour deux valeurs limites posées sur α_g , soit $6.0 \cdot 10^{-7}$ et $1.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

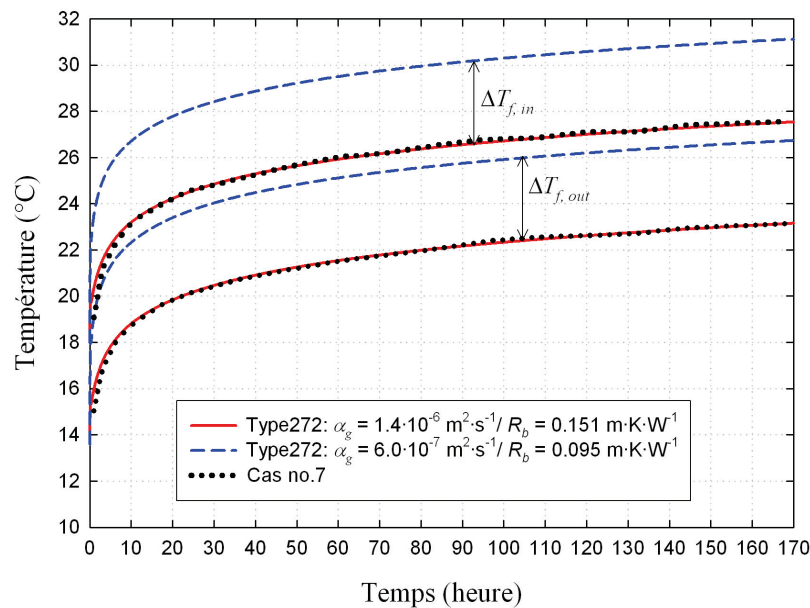


Figure A.8.1: Effets de la variation de la diffusivité thermique du sol sur les résultats du Type272.

Les résultats présentés à la Figure A.8.1 montrent l'importance de la réalisation d'un essai de réponse thermique permettant de s'assurer que la valeur de la diffusivité thermique estimée est adéquate pour le dimensionnement de l'échangeur géothermique. Pour une meilleur correspondance entre les résultats du modèle et les données expérimentales, il est possible de calibrer le modèle en faisant varier la valeur de α_g à l'intérieur de limites jugées acceptables selon la nature du sol entourant le puits.